

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Modernizace pracoviště měření otáček a vibrací v laboratoři senzorů  
neelektrických veličin**

**Modernisation of Laboratory Experiment for Vibration and Rotation  
Measurement**

2017

Michal Hawranek

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Hawranek**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy  
Téma: Modernizace pracoviště měření otáček a vibrací v laboratoři senzorů  
neelektrických veličin  
Modernisation of Laboratory Experiment for Vibration and Rotation  
Measurement  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Řada úloh pro měření a testování je dnes vyhodnocována s využitím technologie Virtuální instrumentace. Jedná se o doplnění PC komponentou pro měření či generování signálů a SW komponentou, která zajistí automatizaci úlohy či sofistikované zpracování signálu. Práce se pokrývá komplexním řešením pracoviště měření otáček a vibrací: návrh mechanické konstrukce, realizace elektro výzbroje a zejména vývojem SW v LabVIEW pro automatizaci úlohy měření v laboratoři senzorů neelektrických veličin.

### Body zadání:

1. Seznámení se s požadavky na úlohu měření otáček a vibrací.
2. Návrh mechanické konstrukce s ohledem na zadané typy senzorů.
3. Seznámení se s oblastí virtuální instrumentace a prostředím LabVIEW.
4. Navržení koncepce obslužného SW úlohy.
4. Implementace SW.
5. Zhodnocení dosažených výsledků závěrečné práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9..
- [2] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 1st ed. Allendale: NTS Press, 2013, 701 s. ISBN 978-1934891087.
- [3] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN a Matt NAWROCKI. *LabVIEW: advanced programming techniques*. 2nd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 978-0-8493-3325-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

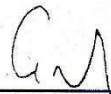
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



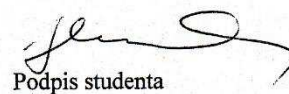
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*



#### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 28.4.2017



Podpis studenta

## ANOTACE

Tato práce popisující modernizaci úlohy pro měření otáček nahrazuje původní úlohu novějšími prvky a technologiemi pro řízení motoru a sběr dat. Cílem práce je návrh a realizace mechanické konstrukce pro měření otáček a vibrací, dále návrh měření a implementace virtuálního přístroje pro sběr a zpracování naměřených dat. Výsledkem měření jsou data z měření polohy a rychlosti motoru, vibrací mechanické konstrukce a hystereze snímačů. Tato data jsou pro další zpracování exportována a archivována v počítači. Koncepce měřicí úlohy má pomoci studentům pochopit vybrané způsoby měření otáček a také sběr a zpracování dat.

***Klíčová slova:*** *krokový motor, snímače neelektrických veličin, sběr dat, virtuální instrumentace*

## ANOTATION

This modernisation of speed measurement exercise replaces the original exercise with a new elements and technologies for motor control and data acquisition. The aim of this task is to design and realize mechanical construction for position and vibration measurement, and further design and implementation of virtual instrument for data acquisition and processing. Measurement results are data of motor position and speed, vibrations of mechanical construction and sensors hysteresis. These data are exported and archived into computer. The concept of the entire exercise helps the students to understand predominantly the chosen methods of speed measurement and data acquisition including their processing.

***Keywords:*** *stepper motor, sensors of non-electric quantities, data acquisition, virtual instrumentation*

## Obsah

Seznam použitých zkratk	2
Seznam ilustrací	3
Seznam tabulek	4
Úvod	5
1 Představení práce	6
2 Krokové motory	7
2.1 Rozdělení krokových motorů	7
2.2 Řízení krokových motorů	9
3 Snímače polohy, rychlosti a zrychlení	13
3.1 Infračervené optické snímače	13
3.2 Magnetické snímače	16
3.3 Snímače zrychlení – akcelerometry	17
4 Návrh mechanické konstrukce	21
4.1 Prvky mechanické konstrukce	21
4.2 Sestavení konstrukce	23
5 Sběr naměřených dat	26
5.1 Teoretický úvod ke sběru dat	26
5.2 Výběr měřicí karty pro sběr naměřených dat	27
5.3 Napájení soustavy a úprava signálů	30
6 Aplikace pro sběr, analýzu a export naměřených dat	32
6.1 Způsob zpracování dat z fyzických kanálů	32
6.2 Návrh virtuálního přístroje	32
6.3 Uživatelské rozhraní	33
Čelní panel	33
Předávání dat mezi smyčkami	34
Vytváření událostí	35
6.4 Řízení motoru	36
6.5 Měření a zpracování naměřených dat	38
Zrychlení (vibrace)	42
Konstantní otáčky	42
Poloha	43
Hystereze	43
6.6 Export naměřených dat	44
Závěr	48
Literatura	49
Seznam příloh	1

## **Seznam použitých zkratek**

PWM	pulse wide modulation
ADC	analogue – digital converter
LED	light emitting diode
MEMS	microelectromechanical systems
SSH	simultaneous sample and hold
VDC	voltage direct current
TTL	transistor – transistor logic
DAQ	data acquisition
FIFO	first in first out
DSP	digital signal processor
IFM	IFM electronic, výrobce snímačů

## Seznam ilustrací

Obr. 1: Mechanická konstrukce práce .....	6
Obr. 2: Princip aktivního krokového motoru [2] .....	7
Obr. 3: Princip pasivního krokového motoru [3] .....	8
Obr. 4: Princip hybridního krokového motoru [4] .....	8
Obr. 5: Čtyřtaktní řízení po jedné fázi [5] .....	9
Obr. 6: Čtyřtaktní po dvou fázích [6] .....	10
Obr. 7: Osmi taktů po dvou fázích [7] .....	10
Obr. 8: Princip mikro krokování s rozdělením kroku na čtvrtiny [8] .....	11
Obr. 9: Závislost točivého momentu na úhlu pootočení při mikro krokování [9] .....	11
Obr. 10: Zapojení fototranzistoru NPN [12] .....	13
Obr. 11: Zapojení přijímačů O6E200 a O6H200 (fotorezistor PNP) [14] .....	14
Obr. 12: Průběhy proudů na detektorech (fototranzistorech) na foto prvcích [16] .....	15
Obr. 13: Spínací signály rotačního inkrementálního snímače [17] .....	15
Obr. 14: Princip magnetoelektrického snímače otáček [19] .....	16
Obr. 15: Spínací výstup Hallova snímače [20] .....	17
Obr. 16: Schéma zapojení magnetického snímače MX5017 [21] .....	17
Obr. 17: Blokové schéma ADXL335BCZP [23] .....	18
Obr. 18: Deska plošných spojů s akcelerometrem ADXL335BCZP [26] .....	20
Obr. 19: Hliníkový profil (item) .....	21
Obr. 20: Horní část konstrukce s plexiskly .....	22
Obr. 21: Hliníková konstrukce se silentbloky .....	22
Obr. 22: Detail snímání kotouč .....	23
Obr. 23: Detail montáže ozubeného kola na společnou hřídel .....	23
Obr. 24: Detail montáže senzoru Analog Devices ADXL335BCZP .....	24
Obr. 25: Detail montáže páru senzorů IFM O6H200 a O6S200 .....	24
Obr. 26: Detail montáže senzorů IFM MX5017 a O6E200 .....	24
Obr. 27: Detail montáže snímače IFM RV1016 .....	25
Obr. 28: Detail montáže motoru National instruments ISM-7411E .....	25
Obr. 29: Vhodná a nevhodná volba vzorkovací frekvence [28] .....	26
Obr. 30: Příklad aliasingu před vzorkováním [30] .....	27
Obr. 31: Příklad aliasingu po vzorkování [31] .....	27
Obr. 32: Základní způsoby vzorkování signálu měřicími kartami [32] .....	28
Obr. 33: Zapojení použité svorkovnice připojené ke kartě NI USB-6251 .....	29
Obr. 34: Schéma zapojení desky pro úpravu napájení a výstupních signálů .....	30
Obr. 35: Deska plošných spojů pro úpravu napájení a výstupních signálů ze senzorů .....	31
Obr. 36: Zjednodušené blokové schéma aplikace .....	32
Obr. 37: Pravá část čelního panelu virtuálního přístroje .....	33
Obr. 38: Levá část čelního panelu virtuálního přístroje .....	34
Obr. 39: Struktura clusteru front .....	35
Obr. 40: Smyčka pro vytváření události po stisku tlačítka s událostí „Stop all“ .....	35
Obr. 41: Zápis události po stisku tlačítka Export .....	36
Obr. 42: Smyčka ovládání motoru s událostí pro zastavení motoru .....	36
Obr. 43: Událost pro roztočení motoru nebo aktualizaci parametrů otáčení .....	37
Obr. 44: Událost pro zastavení smyčky „Motor“ .....	37
Obr. 45: Událost pro povolení motoru .....	37
Obr. 46: Událost pro získávání referenčních hodnot z motoru .....	37
Obr. 47: Smyčka „Měření“ s událostí „Default“ .....	38
Obr. 48: Událost inicializace před měřením .....	39
Obr. 49: Konfigurace digitálních vstupů .....	39
Obr. 50: Konfigurace analogových vstupů .....	40
Obr. 51: Událost měření fyzických kanálů měřicí karty .....	40
Obr. 52: Událost pro zastavení měření .....	41
Obr. 53: Událost pro zastavení smyčky "Měření" .....	41

Obr. 54: Funkce pro výpočet zrychlení z výstupních napětí akcelerometru .....	42
Obr. 55: Funkce pro výpočet úseku mezi náběžnými hranami .....	42
Obr. 56: Funkce pro výpočet otáček za sekundu a rozdílu otáček ve stupních .....	43
Obr. 57: Funkce pro výpočet polohy motoru .....	43
Obr. 58: Funkce pro výpočet polohy všech hran nasnímaných značek.....	44
Obr. 59: Funkce „Výpočty“ s výpočty režimu „Poloha“ .....	45
Obr. 60: Výpočty režimu „Konstantní otáčky“ .....	45
Obr. 61: Výpočty režimu „Hystereze“ .....	46
Obr. 62: Smyčka „Export“ s událostí „Stop“ .....	46
Obr. 63: Událost pro export naměřených dat .....	47
Obr. 64: Ukázka kódu zápisu dat s časovým razítkem do listu souboru excel.....	47

## Seznam tabulek

Tab. 1: Zvolené úvodní parametry .....	28
Tab. 2: Tabulka použitých zařízení .....	28

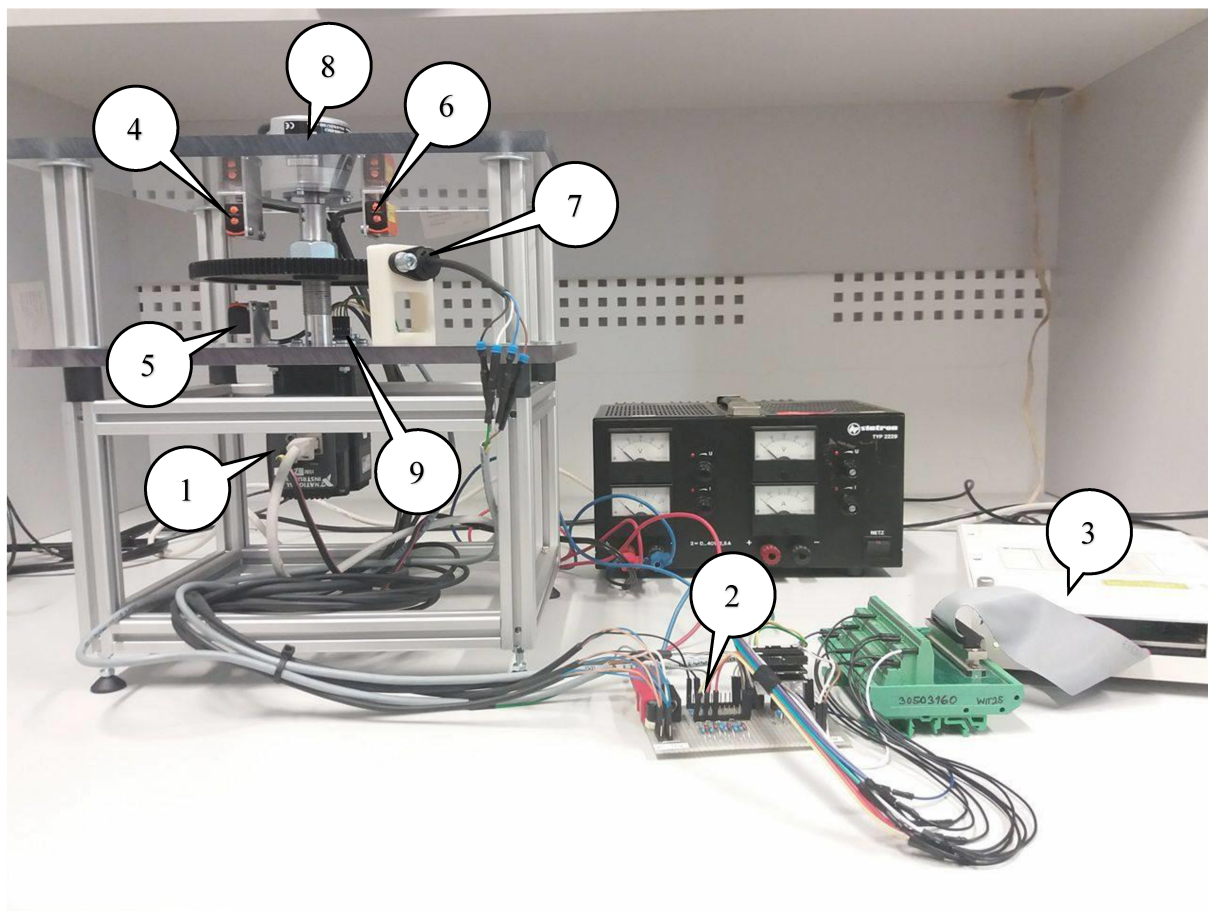
## Úvod

Úloha pro měření otáček motoru je jednou ze základních měřících úloh pro laboratoř senzorů neelektrických veličin nacházející se na Fakultě Elektrotechniky a Informatiky Vysoké školy báňské - Technické univerzity v Ostravě. Dosavadní provedení úlohy bylo zastaralé, a proto bylo správcem laboratoře rozhodnuto o její modernizaci.

V nové podobě nabízí úloha více možností měření otáček motoru a měření vibrací. Pro seznámení s problematikou návrhu a řešení byl vypracován teoretický rozbor k zvolenému typu motoru a vybraným snímačům včetně sběru dat. Všechny potřebné informace pro návrh i pro vyhodnocení naměřených dat jsou sepsány v příslušných kapitolách, které slouží jako teoretický podklad.

Zpracovávaná měřící úloha snímá několika snímači najednou. Signály ze snímačů jsou přivedeny na analogové a digitální vstupy měřící karty DAQmx. Měřící karta digitalizuje vstupní signály, aby bylo možné s nimi dále pracovat v počítači. Zpracování naměřených dat probíhá ve virtuálním přístroji vytvořeném v prostředí LabVIEW. Pro tuto úlohu byl zvolen typ motoru, který umožnil sloučit měření a ovládání motoru do jedné aplikace. Přístroj nabízí několik možných režimů pro řízení motoru a zpracování naměřených dat.

# 1 Představení práce



*Obr. 1: Mechanická konstrukce práce*

1. Měřený krokový motor Nacionál Instruments ISM-7411E
2. Deska plošných spojů pro napájení snímačů a úpravu jejich výstupních signálů
3. Měřicí karta Nacionál Instruments USB-6251 pro sběr dat
4. Jednocestná závora IFM O6E200 – přijímač
5. Jednocestná závora IFM O6S200 – vysílač
6. Reflexní snímač IFM O6H200
7. Magnetický snímač IFM MX5017
8. Inkrementální rotační snímač IFM RV1016
9. Akcelerometr Analog Devices ADXL335BCZP

Následující kapitoly obsahují informace k použitým zařízením, mechanické konstrukci a aplikaci pro ovládání motoru a sběr naměřených dat.



## 2 Krokové motory

Krokový motor je typ motoru, jehož pohyb je založen na postupném přivádění pulsů do jednotlivých cívek statorového vinutí. To znamená, že pohyb se skládá tzv. kroků. Krokování může vzdáleně připomínat spojitě otáčení motoru, avšak při přivedení napájení na jednu dvojici cívek se motor pouze pootočí. Roztočení motoru spočívá v sekvenčním přivádění impulsů na statorová vinutí. Délka jednoho kroku je závislá na počtu pólů statoru, a rotoru. Princip řízení krokového motoru uvádí webová stránka Stomisi.cz [1].

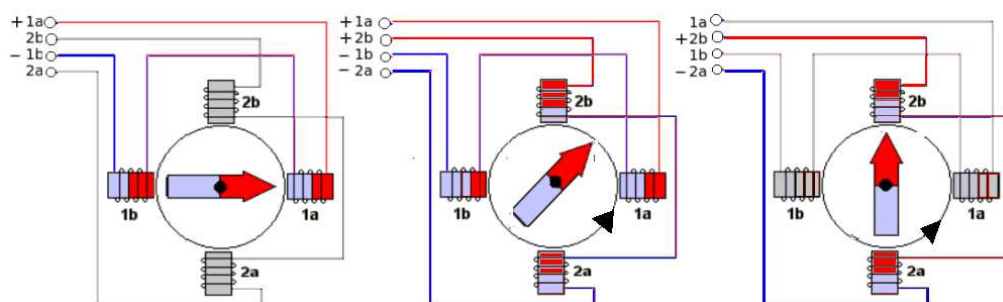
Pro danou úlohu byl vybrán krokový motor Nacionál Instruments ISM-7411E. Tento krokový motor má integrovaný mikrokontroler pro řízení pohybu motoru a vlastní enkodér. Nejen z hlediska řízení motoru, ale i pro průběh měření, je nezbytné uvést vnitřní strukturu motoru. Jedná se o hybridní krokový motor s možností mikro krokování, což představuje kombinaci základních principů krokových motorů, které jsou níže uvedeny.

### 2.1 Rozdělení krokových motorů

#### Aktivní krokové motory

Pod pojmem aktivní krokový motor se rozumí ty motory, jejichž rotor je zhotoven z radiálně polarizovaného permanentního magnetu. Následný postup buzení ilustruje Obr. 2. Buzení motoru je na tomto obrázku řešeno dvoufázovým osmitaktím řízením.

Magnet je zpočátku v ose statorového páru č.1 přitahován silou odpovídající polaritě tohoto páru. Polarita závisí na směru toku proudu cívky, která vytvoří statické elektromagnetické pole. Do polohy magnetu v ose statorového páru č.2 s polarizací severního pólu směrem nahoru se motor dostane přivedením kladného impuls ze strany horního pólu, právě k němu bude severní pól magnetu přitahován.

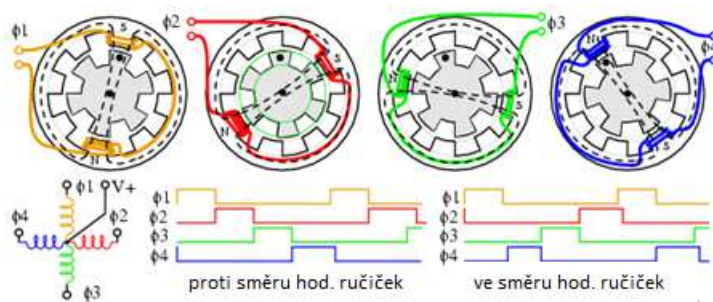


Obr. 2: Princip aktivního krokového motoru [2]

## Pasivní krokové motory

Pasivní krokové motory mají rotory s vyniklými póly z magneticky měkké oceli. Proto se jim také říká reluktanční. Změna polohy rotoru je uskutečňována díky změně magnetického odporu mezi rotorem a statorem.

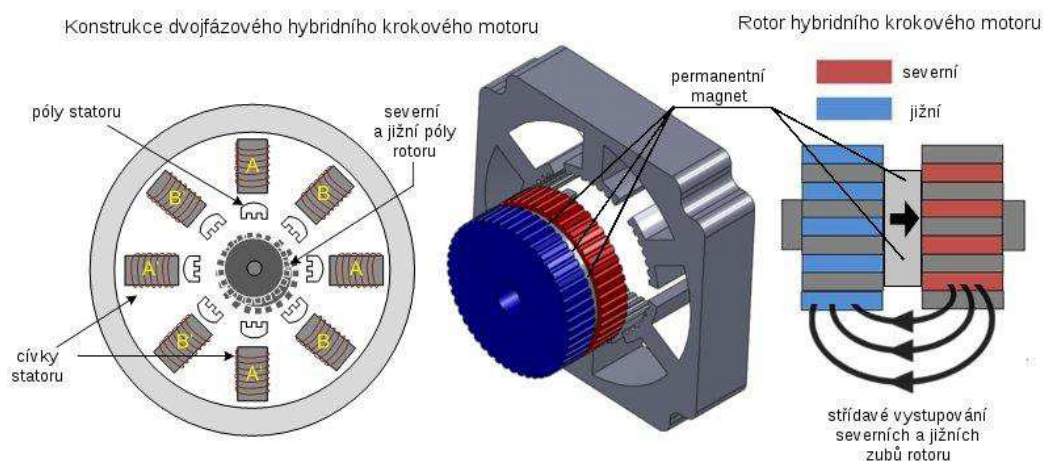
Na Obr. 3 je řez magnetického obvodu čtyřfázového krokového motoru s pasivním rotorem. Na statoru je 8 pólů s navinutými cívkami. Dvojice cívek na protilehlých pólech je spojena a tvoří jednu fázi, obdobně jako u aktivních krokových motorů. Při buzení určité dvojice dochází k vybuzení magnetického toku v rotoru a působení síly ve směru maximálního přiblížení s přilehlou dvojicí rotorových pólů.



Obr. 3: Princip pasivního krokového motoru [3]

## Axiální (hybridní) krokové motory

Označení „hybridní“ v názvu tohoto typu motoru poukazuje na fakt, že se jedná o kombinaci dvou předešlých typů. Rotor je zde polarizovaný axiálně a na svém povrchu obsahuje až 50 zubů. Stator obsahuje o dva zuby méně a rozděluje tak statorové zuby do čtyř skupin, což odpovídá počtu pólových dvojic rotoru: úplně přilehlé k zubům rotoru, posunuté o polovinu vlevo, posunuté o polovinu vpravo a úplně odlehle od zubů rotoru.



Obr. 4: Princip hybridního krokového motoru [4]

Výpočet velikosti jednoho kroku motoru:

$$k = \frac{1}{p} \cdot \frac{360}{z} = \frac{1}{4} \cdot \frac{360}{50} = \frac{360}{200} = 1,8^\circ \quad (1.1)$$

kde: k...je úhel pootočení jednoho kroku

p...je počet pólových dvojic statoru

z... je počet zubů rotoru

Z velikosti úhlu pootočení jednoho kroku tedy vyplývá, že motor má 200 kroků na otáčku. Použitý motor NI ISM-7411E obsahuje až 51200 kroků na otáčku. Toho je dosaženo mikro krokováním, které je podrobněji popsáno v kapitole 2.2.

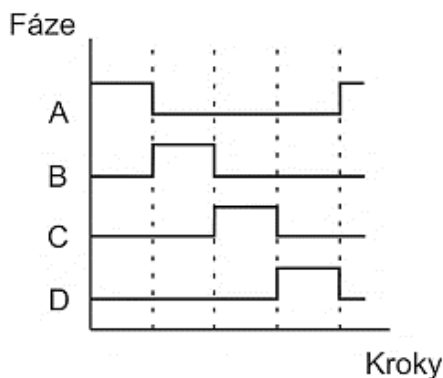
## 2.2 Řízení krokových motorů

Krokové motory lze řídit několika způsoby podle toho, v kolika taktech se řízení periodicky opakuje a kolik fází je současně buzeno.

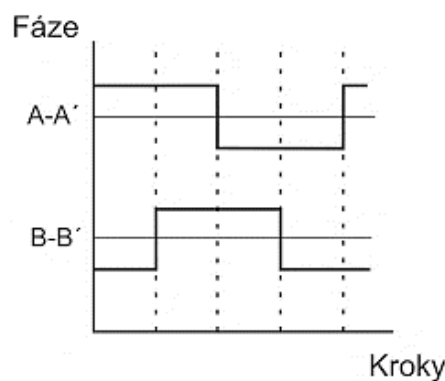
### Čtyřtaktní způsob ovládání po jedné a dvou fázích

Na

Obr. 5 je popsáno, jak je motor postupně buzen po jedné fázi. Při dvoufázovém řízení, kdy je pól rotoru mezi póly statoru, lze budit 2 fáze najednou, jak znázorňuje: Obr. 6.



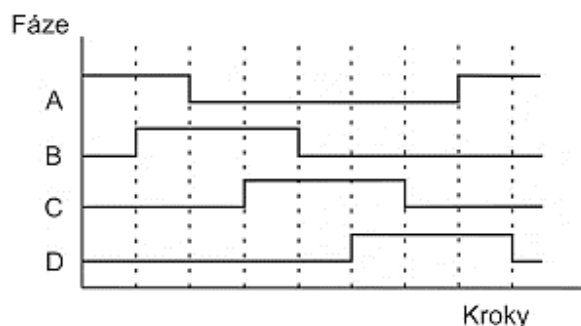
Obr. 5: Čtyřtaktní řízení po jedné fázi [5]



Obr. 6: Čtyřtaktí po dvou fázích [6]

### Osmi taktní způsob ovládání po dvou fázích

Osmi taktní řízení se vyznačuje možností nastavení polovičního kroku. Sekvence napájení cívek vypadá následovně: A-AB-B-BC-C-CD-D-DA... Při změně napájení do jedné a do dvou cívek však dochází ke změně provozního momentu, ten je ve výsledku menší. Příklad osmi taktního krokování je znázorněno na Obr. 7.

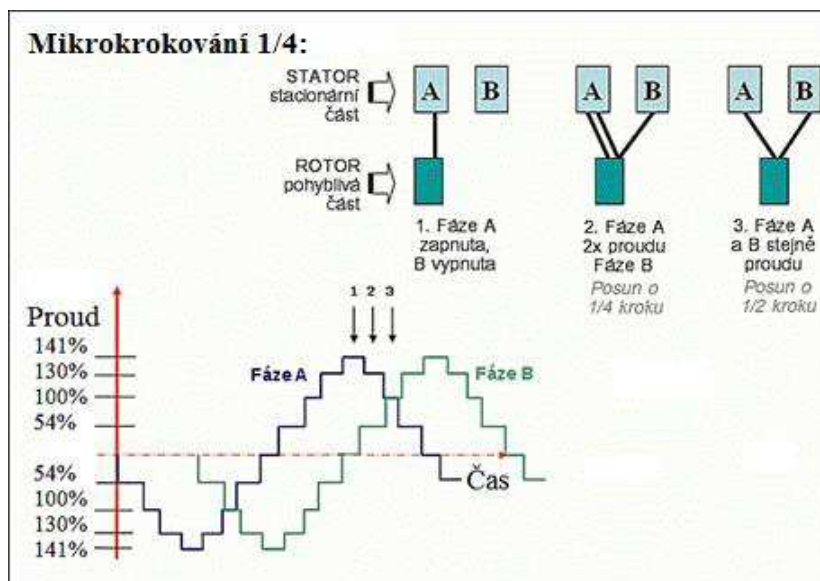


Obr. 7: Osmi taktní po dvou fázích [7]

### Mikro krokování

Mikro krokování umožňuje polohování motoru mezi jeho kroky. Princip vychází z osmi taktního řízení, avšak velikosti proudů tekoucích do cívek jsou odlišné. Velikost proudu je nastavena modulátorem pulsní šířkové modulace (PWM). Signál s PWM modulací je puls o šířce závislé na vstupním signálu PWM modulátoru. Vstupním signálem tohoto modulátoru je výstup ADC převodníku mikrokontroleru. Rozlišení ADC převodníku mikrokontroleru určuje počet nastavitelných velikostí výstupního signálu. ADC převodník v mikrokontroleru motoru NI ISM-7411E má rozlišení 8 bitů, což umožňuje rozdělit každý krok do 256 poloh podle velikosti dodávaného proudu do statorových cívek.

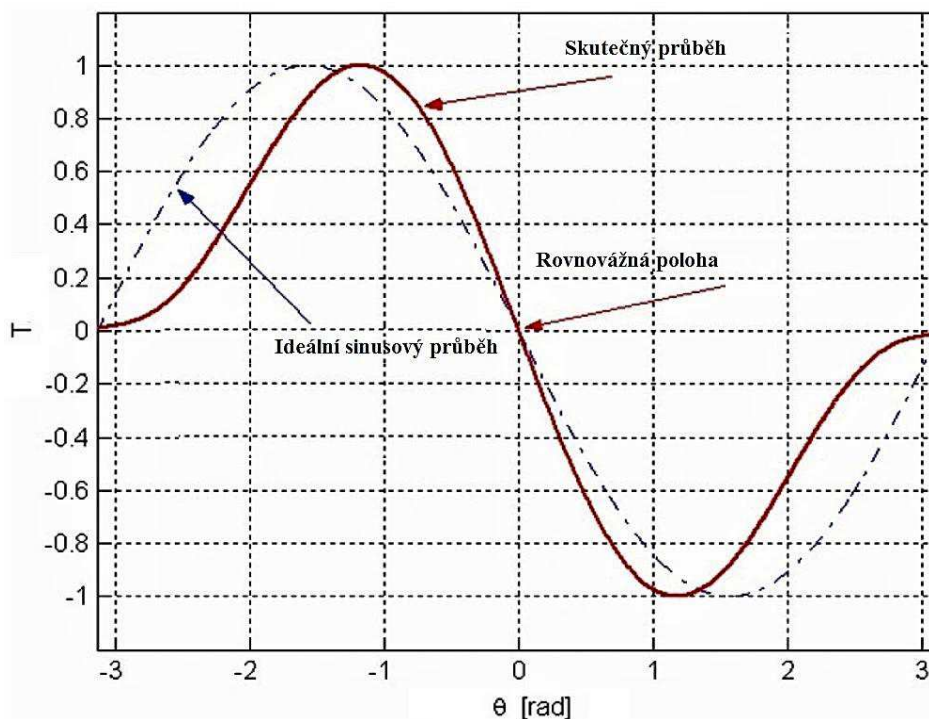
Signály „Fáze A“ a „Fáze B“ na Obr. 8 představují velikosti dodávaných proudů do cívek „A“ a „B“. Během postupného zvyšování dodávaného proudu do jedné cívky je současně snižován dodávaný proud v cívce druhé.



Obr. 8: Princip mikro krokování s rozdělením kroku na čtvrtiny [8]

Při zvyšování počtu poloh mezi kroky klesá točivý moment motoru. Nízký točivý moment motoru může vést ke ztrátě kroků.

Přidrzný moment motoru udržuje motor v jeho kroku. Motor je vlivem přidrzného momentu při rozběhu přibrzďován ve svém kroku a při doběhu je naopak přitahován do následujícího kroku. To značně snižuje přesnost polohy motoru mezi jednotlivými kroky zejména při nízkém točivém momentu. S nízkým točivým momentem klesá moment přidrzný. Tento moment tvoří asi 5-20 % točivého momentu. Na obrázku je vidět, jak se skutečný moment motoru liší od ideálního průběhu.



Obr. 9: Závislost točivého momentu na úhlu pootočení při mikro krokování [9]

Nevýhoda metody mikro krokování spočívá v tom, že při vysokém počtu poloh, tj. nízkém točivém momentu, se zároveň motor vystavuje velké citlivosti vůči vyvážení hřídele, a právě to bude mít značný vliv na polohu motoru mezi jednotlivými kroky v případech, kdy bude hřídel motoru nevyvážená. Špatné vyvážení hřídele a vibrace soustavy ve vysokých otáčkách mohou vést k tomu, že motor bude přeskakovat do svých celistvých kroků. Pro měření to znamená, že při konstantní rychlosti motoru se bude hodnota vyčtená z jeho interního enkodéru průběžně měnit. Tento rozdíl v rychlosti bude lineárně narůstat vzhledem k rychlosti motoru.

Zdrojem informací o principu a problematice mikro krokování se stala webová stránka Robodoupě.cz [10].

### 3 Snímače polohy, rychlosti a zrychlení

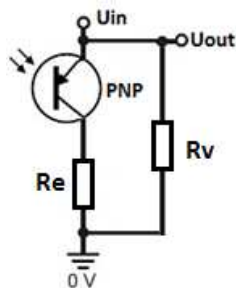
V této kapitole je uveden teoretický rozbor jednoznačný ke snímačům, které jsou v úloze použity. Zde jsou uvedeny pouze nezbytné principy snímačů k další práci s úlohou.

#### 3.1 Infračervené optické snímače

Optické senzory využívající světelného záření k přenosu informace jsou velice užitečné v oblastech zjišťování polohy předmětu (detekce průchodu, velikosti, průhybu...), např. na pásových dopravnících. V zadané úloze je využito optických snímačů k snímání velikosti otáček a polohy za pomoci snímacího prvku, který je navržený s ohledem na parametry snímačů, viz. kapitola 5.2. [11]

Principy vybraných optických snímačů jsou velice obdobné. Obsahují vysílač a přijímač. Zdrojem světelného paprsku vysílače, v rozsahu infračervených nebo červených vlnových délek, je LED dioda. Příjímačem záření je fototranzistor v zapojení s otevřeným kolektorem.

Fototranzistor je osvětlován v oblasti přechodu báze-emitor a výstupní snímanou veličinou je velikost napětí na výstupu fototranzistoru. Ve stavu, kdy je přijímač osvětlen, se fototranzistor plně otevře a na jeho výstupu je pouze saturační napětí ( $\log 0$ ). V opačném případě, tj. zamezením osvětlení přechodu, je přijímač uzavřen a na jeho výstupu je plně napájecí napětí ( $\log 1$ ). Výstupní signál snímače je měřen skrze rezistor, aby nedošlo ke zkratu, který by znemožnil překlápění fototranzistorů. Použité optické snímače IFM O6H200 a O6E200 obsahují fototranzistory typu PNP, vnitřní schémata zapojení je uvedeno na Obr. 10. Potřebné informace o použitém snímači poskytl webová stránka IFM.com [11].

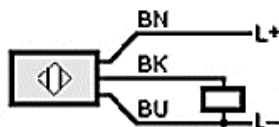


Obr. 10: Zapojení fototranzistoru NPN [12]

## a) Světelné závory

### • Jednocestná světelná závora

Jednocestnou světelnou závorou je myšlen jednosměrný přenos paprsku z vysílače do přijímače. Na druhém konci pomyslné úsečky snímaného úseku paprskem, je přijímač, v tomto případě IFM O6E200, jehož schéma zapojení vstupů a výstupů je Obr. 11. Potřebné informace o použitém snímači poskytla webová stránka IFM.com [13].



Obr. 11: Zapojení přijímačů O6E200 a O6H200 (fotorezistor PNP) [14]

### • Reflexní světelná závora

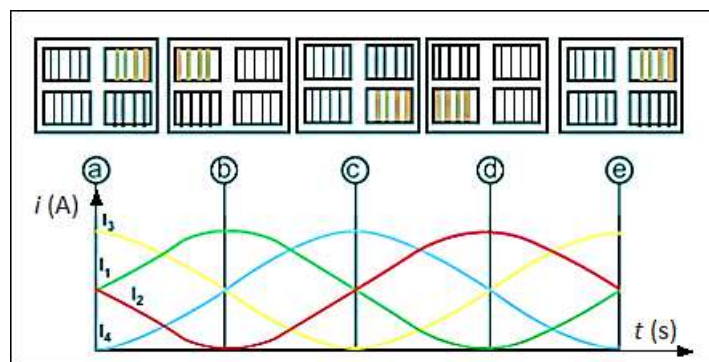
Zde je funkce přijímače a vysílače sloučena do jediného prvku. Princip změny v přijímání paprsku spočívá ve změně světelné pohltivosti materiálu, od kterého se paprsek odráží. Snímací disk rozebraný a zobrazený v kapitole 4.1 má rovnoměrně vyvrtané díry, skrze které snímač vysílá světlo. Rozdíl pohltivosti je proveden tak, že podložka pod snímanou dírou je matně bílá a disk byl přebarven matně černou barvou. Lesklé barvy se pro toto použití nedoporučují, neboť jejich pohltivost nemusí být vlivem lesku konstantní. Snímač by tak nemusel pracovat správně. Typ reflexní světelné závory IFM O6H200 obsahuje stejný typ fototranzistoru, stejně jako výše používaný přijímač jednocestné světelné závory, jejíž schéma zapojení je na obrázku Obr. 11. Potřebné informace o použitém snímači poskytla webová stránka IFM.com [15].

## b) Rotační inkrementální snímače

Výhodou tohoto velice často používaného optoelektronického snímače je, oproti výše zmíněným optickým snímačům, schopnost získání informace o směru otáčení. Jejich konstrukční provedení se soustředí přímo na měření otáček, a to skrze hřídel, která je spojena s hřídelí snímaného motoru. Tento snímač tak, na rozdíl od výše zmíněných typů optických snímačů, nelze použít pro stejné aplikace, neboť vyžaduje mechanické spojení se snímaným předmětem, a to konkrétně s hřídelí.

Pro generování výstupního signálu je zde použit opět vysílač (zdroj světla) a přijímač (fototranzistor). Vysílačem je LED dioda, která prosvětluje kotouč. Kotouč obsahuje pět mřížek, kde čtyři mřížky jsou posunuté o čtvrtinu periody a pátá slouží jako nulový index pro určení počátku. S otáčením kotouče dochází k postupnému nárůstu a poklesu velikosti světelného toku, který skrze kotouč dopadá na přijímač, fototranzistor. Proto je výsledkem sinusový signál s frekvencí přímo úměrnou rychlosti otáčení, jak je ilustrováno na Obr. 12.

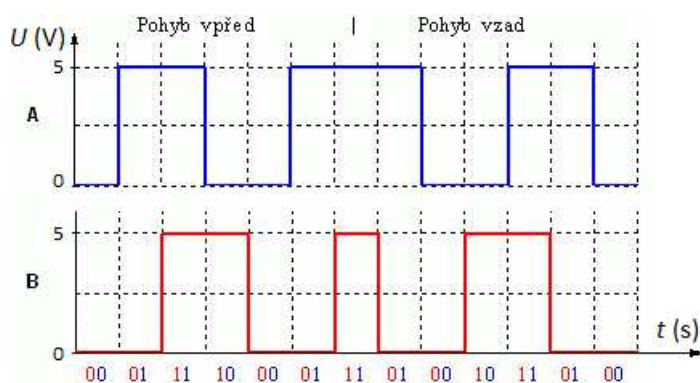




Obr. 12: Průběhy proudů na detektorech (fototranzistorech) na foto prvcích [16]

Pro získání symetricky rozloženého signálu je využito posunutí mezi signály o  $90^\circ$ . Aplikováním diferenciální metody v podobě antiparalelního zapojení fotodetektorů (I3-I4, I1-I2) se získají dva sinusové průběhy s fázovým rozdílem  $90^\circ$  mezi sebou. Důsledkem aplikace diferenciální metody je odrušení symetrického rušivého napětí. Symetrické rušivé napětí má při srovnání signálu a jeho převrácené polarity o  $180^\circ$  stejnou velikost, proto je odečtením těchto signálů eliminováno.

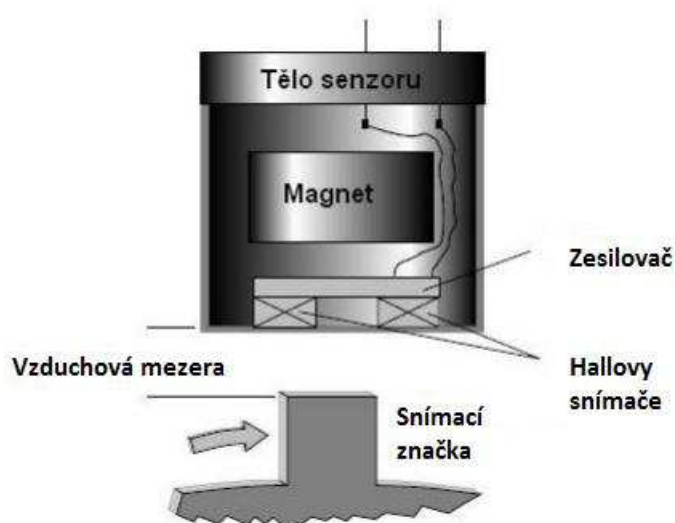
Změna sinusových signálů na obdélníkové se provádí pomocí napěťových komparátorů. Výsledný signál ze senzoru je ilustrován na Obr. 13. Použité poznatky uvádí ve své diplomové práci Zbyněk Jehlár [16].



Obr. 13: Spínací signály rotačního inkrementálního snímače [17]

### 3.2 Magnetické snímače

Snímání magnetických snímačů je založeno na změně reluktance neboli magnetického odporu snímaného prvku. Použitý senzor IFM MX5017 zaznamenává zuby ozubeného kola na základě Hallova snímače. Hallův snímač se skládá z polovodičové destičky napájené proudem. Působením magnetického pole zubů kola kolmo na proud, který prochází polovodičovou destičkou vzniká tzv. Hallovo napětí, a to mezi hranami destičky, které jsou rovnoběžné s protékajícím proudem. Princip snímání je znázorněn na Obr. 14. Princip Hallova jevu byl čerpán z textů pro výuku fyziky uvedených na webové stránce Ufmi.ft.utb.cz [18].



Obr. 14: Princip magnetoelektrického snímače otáček [19]

Pro správnou funkci snímače se musí shodovat modul ozubeného kola s modulem snímače. Parametr modul je poměr mezi průměrem ozubeného kola a počtem zubů na jeho povrchu. Následující vztah popisuje závislost modulu ozubeného kola na jeho parametrech, který je ověřen zvolenými parametry tak, aby splňoval kritérium snímače.

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z} = \frac{160}{128} = 1,25 \quad (1.2)$$

kde: m... modul snímače, modul snímače IFM MX5017 = 1,25

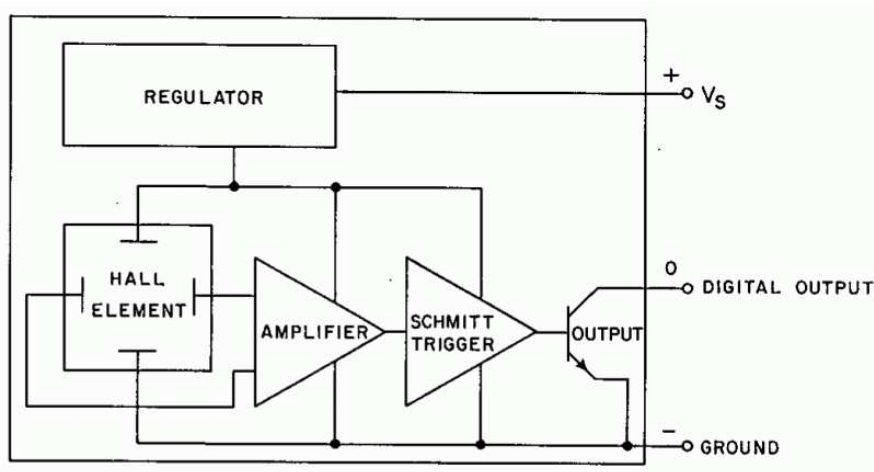
p... zubová rozteč

d... průměr ozubeného kola (mm)

z... počet zubů kola

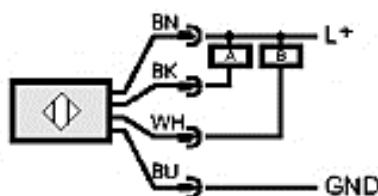
Výstupem magnetického snímače MX5017 jsou dva obdélníkové signály A a B posunuté o 90°. Posunutí signálů docílono vzájemným pootočením Hallových sond o 90° a tvar signálu je zajištěn elektronickými obvody. Tyto obvody výrobce neuvádí, avšak v dokumentaci jsou výstupy snímačů

uvedeny jako výstupy tranzistorů NPN. Schéma na Obr. 15 uvádí běžný typ zapojení, který se pro digitální výstup s tranzistory typu NPN běžně používá.



Obr. 15: Spínavý výstup Hallova snímače [20]

Měřením lze zjistit nejen otáčky a polohu motoru, ale díky zmíněnému posunutí výstupních signálů, také směr otáčení. Schéma kompletního zapojení pro měření je na Obr. 16.



Obr. 16: Schéma zapojení magnetického snímače MX5017 [21]

Potřebné informace o použitém snímači poskytl webová stránka IFM.com [22].

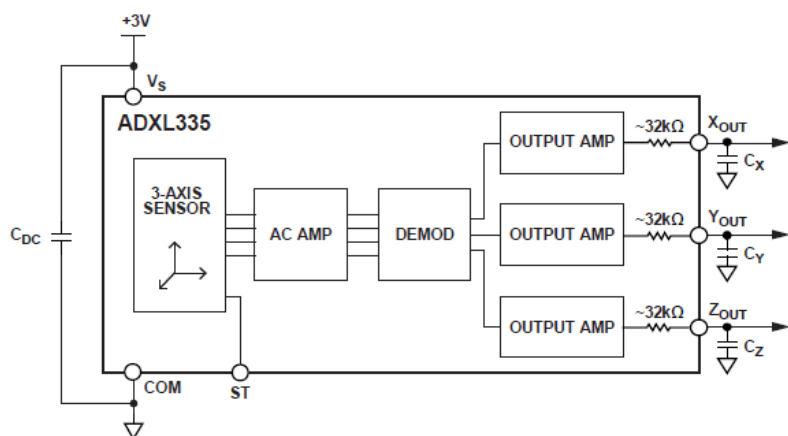
### 3.3 Snímače zrychlení – akcelerometry

Akcelerometry mají schopnost detekovat dynamické změny své polohy. Snímání změny zrychlení v dané ose se získává několika způsoby, které jsou uvedeny s důrazem na vybraný snímač:

- **Piezoelektrické akcelerometry:** využití piezoelektrického krystalu (přírodní nebo umělý), který při zrychlení v určitém směru generuje na svých stěnách náboj úměrný působící síle;
- **Piezorezistivní akcelerometry:** využití piezorezistoru, tedy mikro křemíkové mechanické struktury, kde zrychlení způsobuje změnu velikosti odporu;
- **Akcelerometry s proměnnou kapacitou:** využívají kondenzátory s proměnlivou vzdáleností mezi elektrodami, jedna elektroda je pevná, zatímco druhá je pohyblivá a tvoří závislost mezi zrychlením a kapacitou kondenzátoru.

## Akcelerometry s proměnnou kapacitou

Pro měření byl vybrán akcelerometr s proměnnou kapacitou ADXL335BCZP. Změnou vzdálenosti elektrod se nelineárně mění i kapacita kondenzátoru. Měření na základě kapacitního akcelerometru vyhodnocuje vibrace vzniklé na přírubě motoru, a to ve všech třech osách. Navíc je využito kompaktní provedení v podobě mikro elektromechanického systému MEMS. Technologie MEMS spojuje mikroelektronické systémy (integrované obvody) a mikro mechanické struktury (akční členy, snímače, aj.) na jeden křemíkový substrát. Blokové schéma senzoru je na Obr. 17.



Obr. 17: Blokové schéma ADXL335BCZP [23]

Senzor obsahuje tříelektrodové vzduchové kondenzátory. Kondenzátory jsou spínány hodinovým signálem z oscilátoru. Změna kapacity kondenzátoru se projeví jako změna výstupního napětí. Toto napětí je poté zesíleno a demodulováno za účelem odstranění šumu. Synchronní demodulátor potlačuje signály, které nejsou synchronní s hodinovým signálem. Signál ve fázi s hodinovým signálem bude na výstupu kladný a signál posunutý o  $180^\circ$  bude na výstupu záporný, ostatní signály jsou potlačeny.

Demodulované napětí je přivedeno na výstupní zesilovače a kondenzátory  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$ . Tyto kondenzátory slouží pro určení šířky frekvenčního pásma. Typ akcelerometru Analog Devices ADXL335BCZP je nastavený na šířku pásma 0.5 Hz – 1600 Hz pro všechny osy. Výsledné napětí je charakterizuje zrychlení pomocí převodní konstanty. Převodní konstanta akcelerometru udává, o kolik se musí změnit zrychlení v dané ose, aby se výstupní napětí změnilo o jeden V. Použitý snímač má převodní konstantu 300 mV/g.

Čerpané informace o funkcionalitě tříosých MEMS akcelerometrů uvádí webová stránka Vývoj.hw.cz [24]. Čerpané základní principy akcelerometrů jsou součástí podkladů pro měřicí úlohu uvedených na webové stránce Measure.feld.cvut.cz [25].

Pro výběr typu akcelerometru byl proveden přibližný výpočet zrychlení v místě, kde bude uchycen. Výpočet je pouze orientační, jelikož v něm není přesně definován matematický model konstrukce.

$$l = s = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 0,075 = 0,15 \cdot \pi \text{ m} \quad (1.3)$$

$$v_m = \frac{l}{t} = l \cdot f = 0,15 \cdot \pi \cdot 50 = 7,5 \cdot \pi \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1.4)$$

$$a_{d1} = \frac{v^2}{r} = \frac{(7,5 \cdot \pi)^2}{0,075} = 7400 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1.5)$$

$$F_O = m_s \cdot a_{d1} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 7400 = 59,2 \text{ N} \quad (1.6)$$

$$a_{d2} = \frac{F}{m_k} = \frac{59,2}{3} = 19,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1.7)$$

$$a_p = \frac{a_{d2}}{g} = \frac{19,7}{9,81} = 2,01 g \quad (1.8)$$

Kde:

$m_s = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  ... hmotnost šroubu M8×30

$m_k = 3 \text{ kg}$  zaokrouhlená hmotnost konstrukce

$r = 0,075 \text{ m}$  ... vzdálenost šroubu od osy otáčení

$f_m = 50 \text{ Hz}$  ... frekvence maximálních provozních otáček motoru

$l$  ... obvod kružnice o poměru  $r$

$v_m$  ... maximální rychlost pohybu šroubu

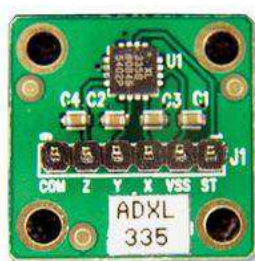
$a_{d1}$  ... odstředivé zrychlení hmotného bodu v ose  $r$

$F_O$  ... odstředivá sílpůsobící na jeden šroub

$a_{d2}$  ... zrychlení působící na konstrukci při dané odstředivé síle  $F$

$a_p$  ... výsledné přetížení

Konstrukce obsahuje tlumící prvky, což vibrace na přírubě motoru, kde je snímač uchycen, sníží (rozběr mechanické konstrukce je uveden v kapitole 4.1). Vybraný akcelerometr má rozsah  $\pm 3$  g, což je plně dostačující k měření zrychlení pro celý rozsah otáček. Mechanické provedení senzoru typu Analog Devices ADXL335BCZP je na Obr. 18. Celý senzor se skládá z integrovaného obvodu se snímačem, z filtračních kondenzátorů a z pinů představující vstupy a výstupy senzoru.



*Obr. 18: Deska plošných spojů s akcelerometrem ADXL335BCZP [26]*

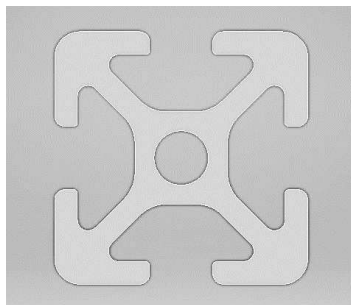
## 4 Návrh mechanické konstrukce

Pro vybraný motor a senzory je navržena mechanická konstrukce. Cílem návrhu bylo sestrojení kompaktní, přenositelné (pokud možno lehké) a uživatelsky přívětivé konstrukce, na kterou bude možno přehledně usadit všechny potřebné prvky.

### 4.1 Prvky mechanické konstrukce

#### Nosná konstrukce

Pro upevnění všech použitých zařízení byl vybrán systém hliníkových profilů tzv. itemů. Většina distributorů hliníkových profilů nabízí široký sortiment příslušenství pro jejich spojení. Konstrukce se dá snadněji skládat, upravovat a demontovat. Navržený rám z hliníkových profilů má čtvercovou podstavu o straně 20 mm. Na Obr. 19 je znázorněn průřez použitého typu itemu Habercorn Profile 5 20x20.

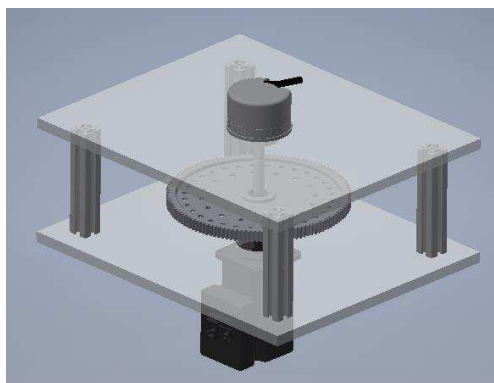


Obr. 19: Hliníkový profil (item)

- Výhody: elegantní provedení, modulárnost
- Nevýhody: vyšší cena

#### Příruba motoru a inkrementálního čidla

Mezi motor, snímací prvek (ozubené kolo) a inkrementální rotační enkodér je nutné umístit desky (příruby) pro jejich pevné uchycení. Zjednodušený snímek z návrhu horní části konstrukce zobrazuje způsob propojení motoru, ozubeného kola a rotačního inkrementálního enkodéru.



Obr. 20: Horní část konstrukce s plexiskly

- Výhody: Použití plexisklových desek umožňuje lepší viditelnost na všechny prvky v konstrukci, a to jak pro běžné užívání, tak pro údržbu.
- Nevýhody: I silnější deska z plexiskla o tloušťce 1cm vykazuje při vyšších vibracích motoru pružnost, což má nepříznivé následky na chod motoru i měření.

### Tlumení konstrukce

Mechanická konstrukce je rozdělena na dvě části, horní a spodní. Horní část představuje rotační část (motor, prodloužená hřídel a hřídel inkrementálního snímače), snímací část (ostatní snímače včetně jejich upevnění) a jejich ohraničení (svislé hliníkové profily a plexisklo). Spodní částí je nosná konstrukce (sestavený hliníkový rám), na kterou je nasazena horní část. Způsob uchycení horního dílu ke spodnímu dílu mechanické konstrukce je řešen silentbloky.

- Výhody: Vibrace vyvolané v horní části se daleko méně přenáší na dolní část konstrukce.
- Nevýhody: Silentbloky způsobují pružnost hliníkových profilů horní části, což zvyšuje rozsah hybnosti horní konstrukce.



Obr. 21: Hliníková konstrukce se silentbloky

### Snímací prvek

Pro snímání polohy a otáček motoru je vyroben speciální ocelový kotouč. Tento snímací kotouč obsahuje vnější ozubení pro magnetický snímač, vyvrtané díry pro optické závory a další díry pro



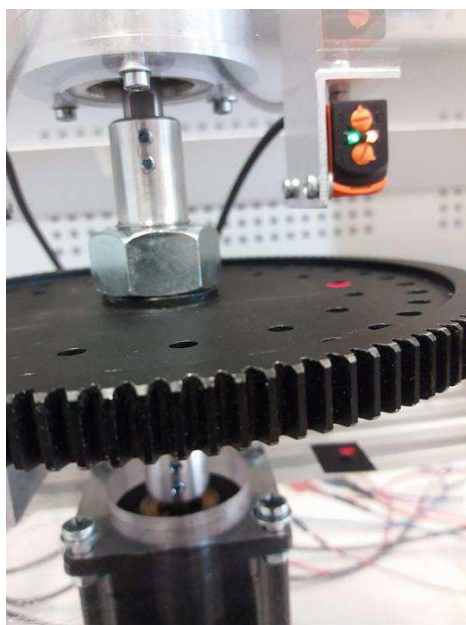
eventuální upevnění šroubů pro změnu vyvážení hřídele. Tato změna může rozšířit úlohu pro měření vibrací. Montáž kotouče se provádí šroubováním závitu ve středu kola na závit prodloužené hřídele, která spojuje motor a inkrementální snímač.



*Obr. 22: Detail snímáního kotouče*

#### **4.2 Sestavení konstrukce**

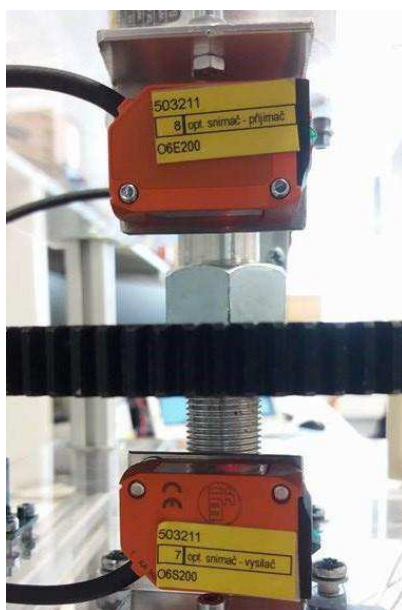
Následující snímky na Obr. 23 až Obr. 28 zachycují montáž použitých senzorů a motoru na mechanickou konstrukci.



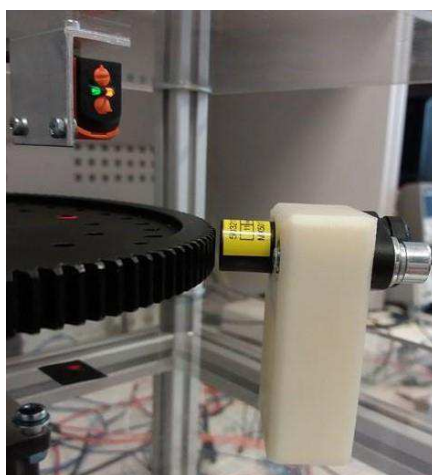
*Obr. 23: Detail montáže ozubeného kola na společnou hřídel*



Obr. 24: Detail montáže senzoru Analog Devices ADXL335BCZP



Obr. 25: Detail montáže páry senzorů IFM O6H200 a O6S200



Obr. 26: Detail montáže senzorů IFM MX5017 a O6E200



Obr. 27: Detail montáže snímače IFM RV1016



Obr. 28: Detail montáže motoru National instruments ISM-7411E

## 5 Sběr naměřených dat

### 5.1 Teoretický úvod ke sběru dat

Signály ze snímačů je nutné digitalizovat a shromáždit v počítači, kde budou dále zpracovávány v připravené aplikaci, jejíž rozbor se nachází v kapitole 6. Pro přenos dat do počítače je použita měřicí karta Nacionál Instruments USB-6251. Při výběru měřicí karty je důležitým parametrem vzorkovací frekvence karty, ta udává, jakou maximální frekvenci lze vzorkovat vstupní signál. V souvislosti s výběrem vhodné měřicí karty jsou vysvětleny níže uvedené pojmy.

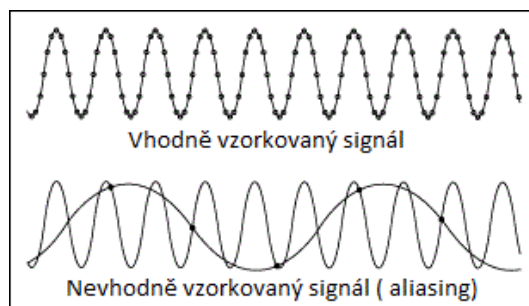
#### Vzorkovací teorém

Vzorkovací teorém, také nazýván jako Nyquistův, Shanonnův nebo Kotělnikovův teorém. Jeho znění říká, že dokonalá rekonstrukce signálu je možná pouze tehdy, pokud je vzorkovací kmitočet alespoň 2 x vyšší, než je maximální frekvence vzorkovaného signálu. Je třeba brát v potaz všechny harmonické složky, ze kterých se signál skládá. Čerpané informace o vzorkování signálu byly čerpány z výukového textu napsané doc. Ing. Petrem Bilíkem, Ph.D. pro předmět „Virtuální Instrumentace 2“ [27].

$$f_N = 2 \cdot f_s \quad (1.9)$$

kde:  $f_N$  ...vzorkovací frekvence  
 $f_s$  ...vzorkovaná frekvence

Při nedodržení vzorkovacího teorému vzniká tzv. aliasing. Příklad je uveden na Obr. 29.

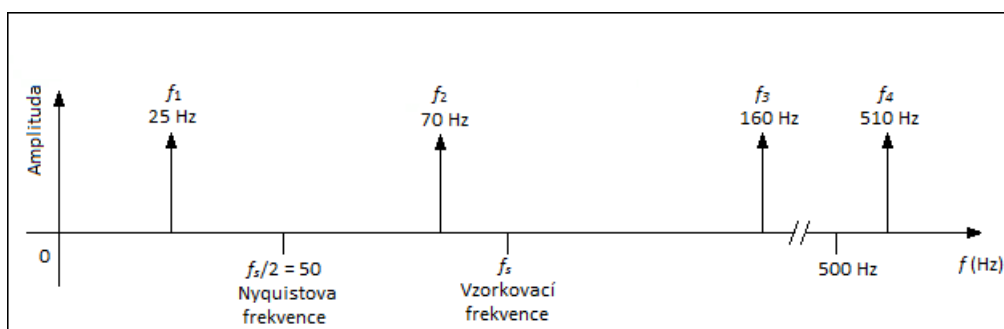


Obr. 29: Vhodná a nevhodná volba vzorkovací frekvence [28]

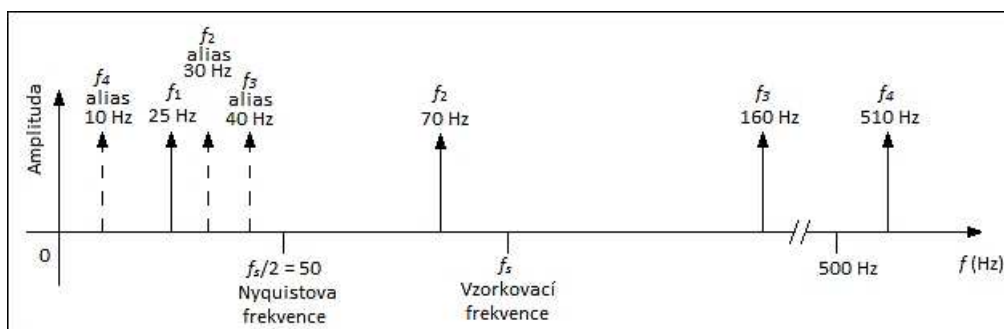
## Aliasing

Aliasing způsobuje zkreslení vzorkovaného signálu tak, že chybně interpretuje frekvence, jejichž dvojnásobek je vyšší než vzorkovací frekvence. Taková frekvence je pak zrcadlově přenesena vůči vzorkovací frekvenci do nižší spektrální oblasti, jeví se jako frekvence nižší. Na Obr. 30 a Obr. 31 je uveden příklad aliasingu zobrazeném ve frekvenční oblasti. Informace o důsledcích aliasingu byly čerpány z webové stránky Zone.ni.com [29].

Příkladem opatření proti aliasingu bývá například navýšení vzorkovací frekvence nebo použití antialiasingových filtrů pro eliminaci nežádoucích frekvenčních složek ještě před samotným vzorkováním.



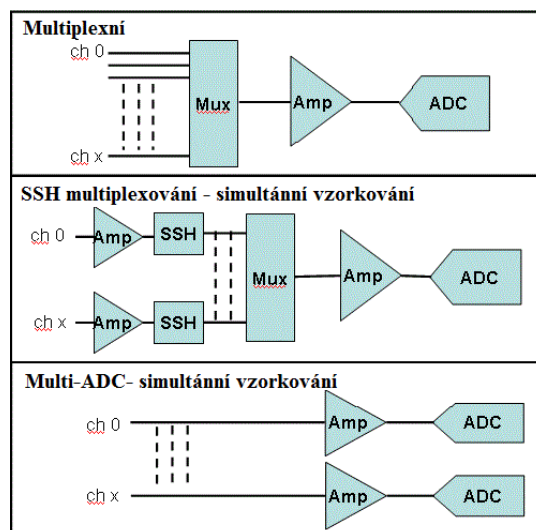
Obr. 30: Příklad aliasingu před vzorkováním [30]



Obr. 31: Příklad aliasingu po vzorkování [31]

## 5.2 Výběr měřicí karty pro sběr naměřených dat

Při vzorkování signálu na měřicí kartě rozhoduje to, zda karta obsahuje jeden převodník pro každý kanál nebo pro všechny společně. Nejběžnější variantou je použití společného převodníku pro všechny kanály, které jsou označovány jako multiplexované. Dalším způsobem je vzorkování s použitím obvodů SSH (simultaneous sample and hold), kde je možno vzorkovat zdánlivě simultánně zachycením signálů v těchto obvodech. Simultánního vzorkování je ovšem dosaženo pouze použitím převodníků pro každý měřený kanál. Stručný přehled základních způsobů vzorkování je na obrázku Obr. 32. Varianty vzorkování signálu podle typu měřicí karty byly čerpány z webové stránky Ni.com [32].



Obr. 32: Základní způsoby vzorkování signálu měřicími kartami [32]

Pro výběr vhodné měřicí karty je nutné zjistit počet a charakter všech signálů ze senzorů, které vstupují do měřicí karty. V tabulce Tab. 1 jsou uvedeny úvodní zvolené parametry. Tabulka Tab. 2 uvádí seznam použitých senzorů včetně jejich klíčových parametrů pro zpracování (napájení, mezní frekvence snímačů a frekvence při maximálních otáčkách motoru).

Tab. 1: Zvolené úvodní parametry

Počet zubů na kotouči (-)	Počet děr v kotouči (-)	Maximální otáčky motoru (ot/min)
128	16	3000

Tab. 2: Tabulka použitých zařízení

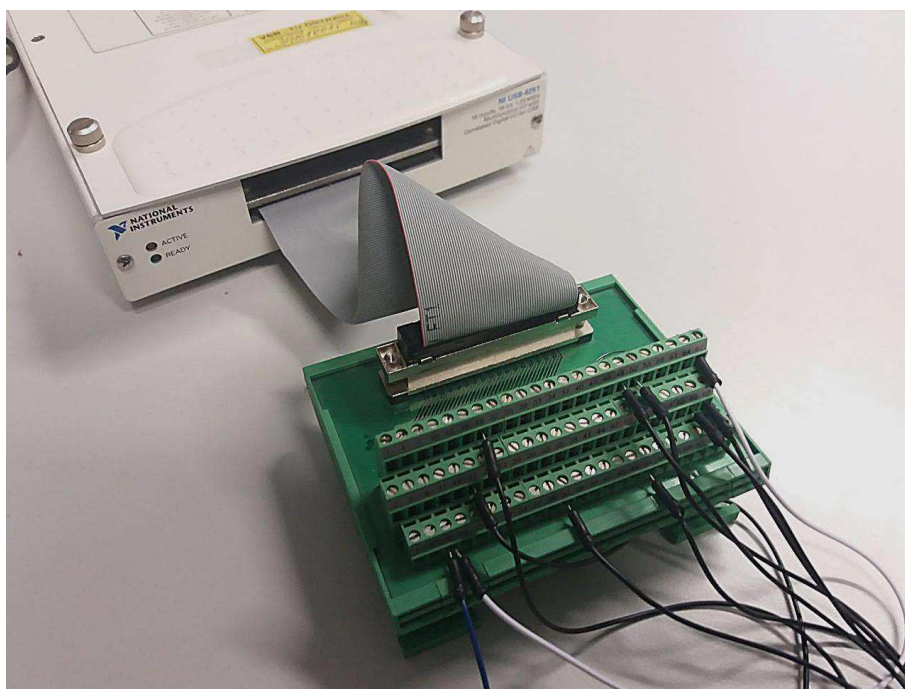
	Označení	$U_{cc}$ (VDC)	$f_{mezní}$ (Hz)	$f_{max}$ (Hz)	Výstup
Pohon	NI ISM 7411E	12-70	-	-	Ethernet
Senzor	O6E(S)200	10-30	1000	800	1xDO
	O6H200	10-30	1000	800	1xDO
	MX5017	7-30	1- 15k	6400	2xDO (A, B)
	RV1016	5±0.5	300k	25000	2xDO (A, B)
	ADXL335BCZP	1.8-3.6 V	1.6 kHz	-	3xAO

Inkrementální snímač RV1016 sice nabízí i negované signály „A“ a „B“ pro odstranění symetrického rušení na vedení, avšak pro zjednodušení nejsou úloze použity, neboť to není nezbytně nutné. Maximální požadovaná vzorkovací frekvence je 50 kHz při maximálních otáčkách motoru a počet použitých kanálů je celkově 9 (6 digitálních a 3 analogové).



Dle parametrů z tabulky Tab. 2 byla vybrána měřicí karta Nacionál Instruments USB-6251. Tato karta disponuje vzorkovací frekvencí analogových vstupů až 1,25 MS/s a je vhodná pro kontinuální vysokorychlostní logování dat. Obsahuje analogové, digitální a čítačové vstupy. Z nich jsou využity vstupy analogové a digitální. Karta obsahuje pouze dva čítačové vstupy, proto k ní není možné připojit všechny signály ze senzorů otáček současně.

Zapojení snímačů k měřicí kartě je realizováno šroubovací svorkovnicí. Kabel z měřicí karty je na tuto svorkovnici připojen způsobem odpovídající kartě Nacionál Instruments PCI/PXI-6221, jak uvádí Obr. 33. Čísla na svorkovnici se k vstupům a výstupům karty připojují podle schématu uvedeného v příloze č.1.



*Obr. 33: Zapojení použité svorkovnice připojené ke kartě NI USB-6251*

Kde jednotlivé signály jsou připojeny následovně:

P0.0... O6H200  
P0.1... O6E200  
P0.2...MX5017, kanál A  
P0.3...MX 5017, kanál B  
P0.4...RV1016, kanál A  
P0.5...RV1016, kanál B  
AI0... ADXL335BCZP, osa X  
AI1... ADXL335BCZP, osa Y  
AI2... ADXL335BCZP, osa Z

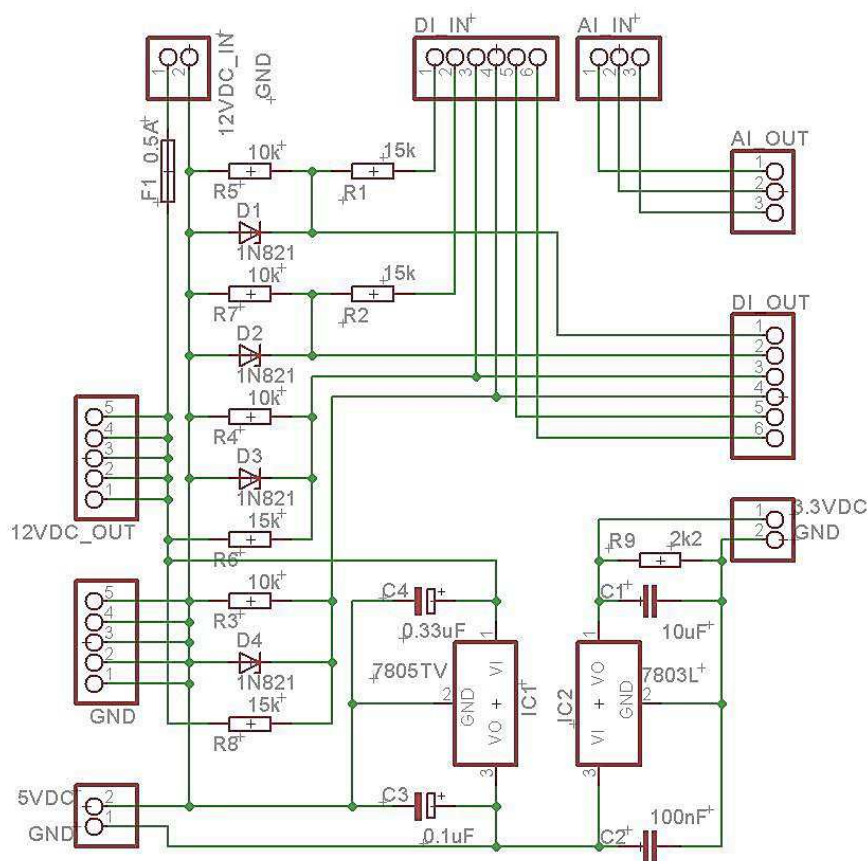
### 5.3 Napájení soustavy a úprava signálů

Na základě tabulky Tab. 2 je navržen systém napájení všech uvedených zařízení v této tabulce. Následující seznam rozděluje komponenty do napěťových hladin, podle kterých jsou napájeny

- 12VDC: motor Nacionál Instruments ISM-7411E, senzory IFM O6E200, O6H200 a MX5017;
- 5VDC: snímač RV1016;
- 3,3VDC: akcelerometr ADXL335BCZP.

Za účelem napájení soustavy a úpravy signálu byla navržena deska plošných spojů. Tato deska upravuje výchozí vstupní napětí 12VDC do požadovaných hodnot pro daný senzor a zároveň upravuje některé výstupní signály ze senzorů, které je nutné převést na logiku TTL (0 – 5V). Důvodem převodu signálů na TTL logiku je následné připojení na digitální vstupy měřící karty. Toho je docíleno napětovými děliči, které jsou navíc doplněny Zennerovými pro ochranu proti přepětí.

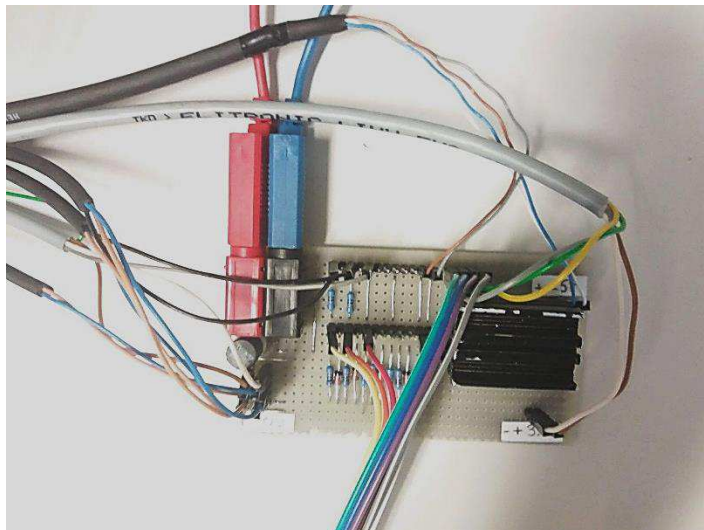
Použité Zenerovy diody na 5V zajišťují, aby hodnoty signálů připojených na digitální vstupy měřící karty nepřekročily 5V. Překročení hodnoty 5V by mohlo vzniknout změnou napájecího napětí, případně naindukováním rušivého napětí na signálové vodiče. Na Obr. 34 je uvedeno schéma zapojení navržené desky.



Obr. 34: Schéma zapojení desky pro úpravu napájení a výstupních signálů



Součet odebíraných proudů ze všech senzorů je přibližně 200mA. Vzhledem k daleko vyššímu proudovému odběru motoru (0.5 – 2A) a jeho změnám odběru proudu jsou napájecí vodiče pro motor vedeny přímo ze svorek zdroje. Tento krok usnadnil výběr ochrany pro desku plošných spojů, která tak za bezporuchového stavu odebírá ze zdroje značně menší proud, a to bez kolísání. Deska je chráněna pojistkou s charakteristikou F (tzv. rychlé pojistky) a maximální hodnotou proudu 0,5A.



Obr. 35: Deska plošných spojů pro úpravu napájení a výstupních signálů ze senzorů

## 6 Aplikace pro sběr, analýzu a export naměřených dat

### 6.1 Způsob zpracování dat z fyzických kanálů

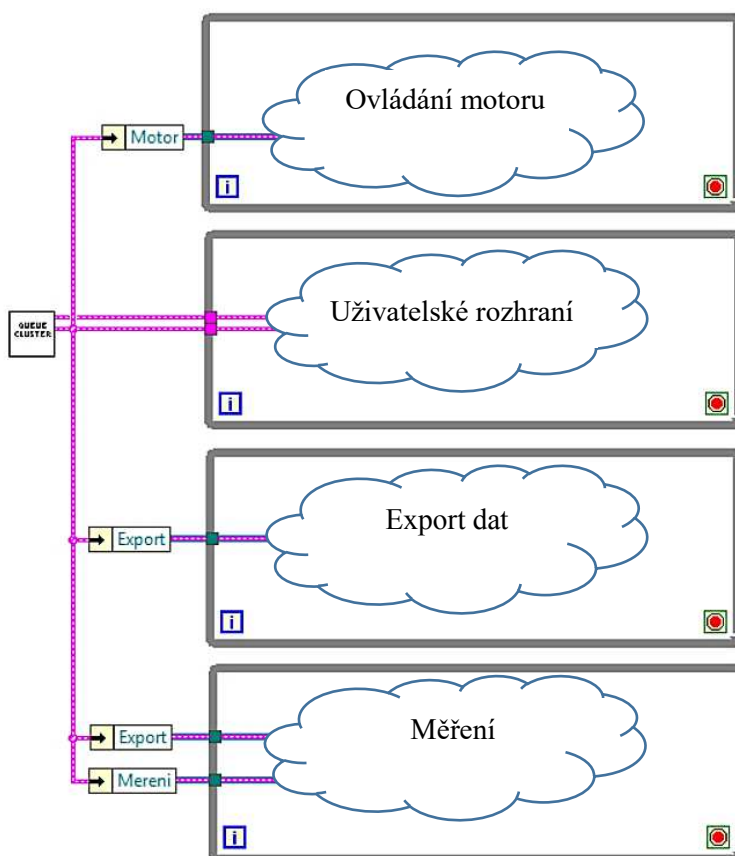
Zpracování signálů z použitých senzorů je rozděleno do dvou skupin, a to analogové vstupy (vibrace) a digitální vstupy (otáčky). Pro zpracování analogových signálů je využit multiplexovaný AD převodník. Analogové vstupy se vzorkují podle vlastních vzorkovacích hodin. To samé však neplatí pro vstupy digitální, ty vlastní interní hodiny nemají.

Řešením je sdílení hodin pro analogové vstupy. Konfigurace analogových a digitálních vstupů se sdílenými hodinami je vysvětlena v kapitole 6.5 s ukázkami kódu na Obr. 49 a Obr. 50.

### 6.2 Návrh virtuálního přístroje

Navržená aplikace se skládá z procesů pro řízení motoru, zpracování naměřených dat a exportu vybraných dat do souboru. Dále tato aplikace obsahuje uživatelského rozhraní pro ovládání zmíněných procesů. Uživatel má kdykoliv možnost zasahovat do parametrů aplikace. Z programátorského hlediska je úloha rozdělena do 4 paralelních úloh (smyček), které jsou řízeny pomocí front. Fronty také slouží pro přenos dat mezi smyčkami. Ve výjimečných případech je použita lokální proměnná, kdy je potřeba jednu hodnotu číst ve více smyčkách. V následujících odstavcích je popsáno řešení jednotlivých dílčích částí úlohy.

Blokové schéma na Obr. 36 je pouze zjednodušené forma schématu, jelikož celý blokový diagram by v rámci formátu A4 nebyl příliš dobře čitelný. Proto je podrobně rozkreslen a rozebrán v příslušných kapitolách.



Obr. 36: Zjednodušené blokové schéma aplikace

### 6.3 Uživatelské rozhraní

V této kapitole je představen čelní panel vyvinuté aplikace. Součástí kapitoly je popis prvků čelního panelu mimo funkcionality jednotlivých tlačítek. Význam každého tlačítka je uveden v příslušné kapitole vztahující se vždy na konkrétní úlohu (smyčku). Dále je zde rozebrán způsob komunikace mezi smyčkami.

#### Čelní panel

Čelní panel je pro uživatele rozdělen na pravou a levou část. I zde je čelní panel pro lepší viditelnost rozdělen do dvou částí na Obr. 37 a Obr. 38.

Pravá část čelního panelu slouží k nastavování parametrů a uživatelským zásahům v podobě tlačítek. Na rozdíl od levé části, všechny prvky pravé části jsou uživateli stále viditelné. Pravá část čelního panelu se dále rozděluje na tyto sekce:

- Řízení motoru: nastavení parametrů pro chod motoru
- Režim výpočtů: výběr výpočetního módu z naměřených dat
- Nastavené otáčky a poloha motoru: indikace nastavených parametrů otáček a polohy motoru
- tlačítka pro ovládání jednotlivých úloh

**Řízení motoru**

Mod pohybu motoru:

Pozice ( $\mu\text{krok}$ ):

Rychlost ( $\frac{\mu\text{krok}}{s}$ ):

Zrychlení ( $\frac{\mu\text{krok}}{s^2}$ ):

Zpomalení ( $\frac{\mu\text{krok}}{s^2}$ ):

Adresa:

**Režim výpočtu**

Mod výpočtu:

**Snimac pro mereni Hystereze**

V ostatních režimech se vohodnocuji vsechny snimace

Typ:

**Export**

Login:

Nazev:

Cesta:

**Nastavene otacky a poloha motoru (podle režimu řízení)**

Referencni rychlost:  Referencni poloha:

**Operace:**

Obr. 37: Pravá část čelního panelu virtuálního přístroje

Pro veliký počet grafů v aplikaci byl na čelní panel umístěn prvek připomínající na sebe naskládané listy, tzv. TabControl. TabControl umožňuje listování mezi grafy, čímž se celková velikost čelního panelu několikanásobně zmenšila a umožňuje jeho zobrazení v přijatelném měřítku i na menších obrazovkách. TabControl dále obsahuje základní informace o nastavení měřicí karty včetně zapojení signálů na svorkovnici a základní informace o nastavení motoru včetně jeho popisu jeho ovládání. Následující seznam popisuje všechny listy TabControlu nacházející se v levé části čelního panelu:

- Data z DAQ: grafy naměřených hodnot zvlášť pro analogové a digitální vstupy
- Referenční data z enkodéru motoru: graf referenční polohy a graf referenčních otáček
- Vypočtená data polohy: graf vypočtených poloh ze všech senzorů a graf vypočtených rozdílů poloh od reference
- Vypočtená data otáček: graf vypočtených otáček ze všech senzorů a graf vypočtených rozdílů otáček od reference vyjádřených ve stupních
- Vypočtená data vibrací: graf vypočtených zrychlení z os akcelometru



Obr. 38: Levá část čelního panelu virtuálního přístroje

## Předávání dat mezi smyčkami

Pro sdílení dat mezi smyčkami a pro vytváření událostí na základě stisku některého z tlačítek čelního panelu byly vytvořeny fronty. V některých případech je však předávání dat mezi smyčkami řešeno lokální proměnnou (vyčtení v jiné smyčce je vyžadováno pravidelně).

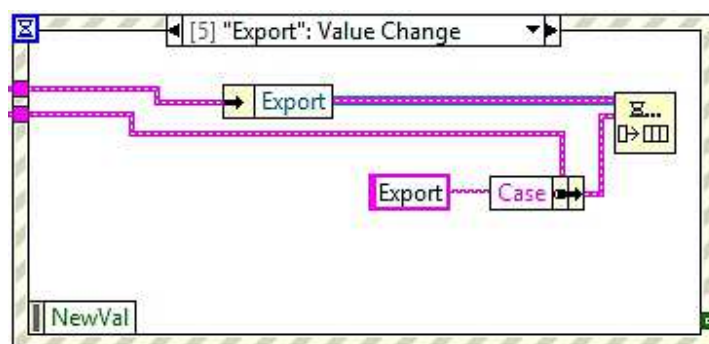
Fronty využívají systém zápisu a čtení FIFO. První zapsaná událost se tak i jako první vykoná. Použití front v kódu zajišťuje efektivní předávání dat mezi smyčkami a také optimalizaci některých

Pro přehlednost v kódu jsou všechny fronty zabalené do jedné struktury zvané „Cluster“. Každá fronta pak obchřstvuejue daty svou vlastní smyčkou. Cluster každé fronty obsahuje dvě proměnné datových typů „String“ (text) a „Variant“ (univerzální proměnná). String slouží pro výběr možnosti selektoru, která se má vykonat ve stavové struktuře case. Variant souží pro přenos libovolného typu dat.

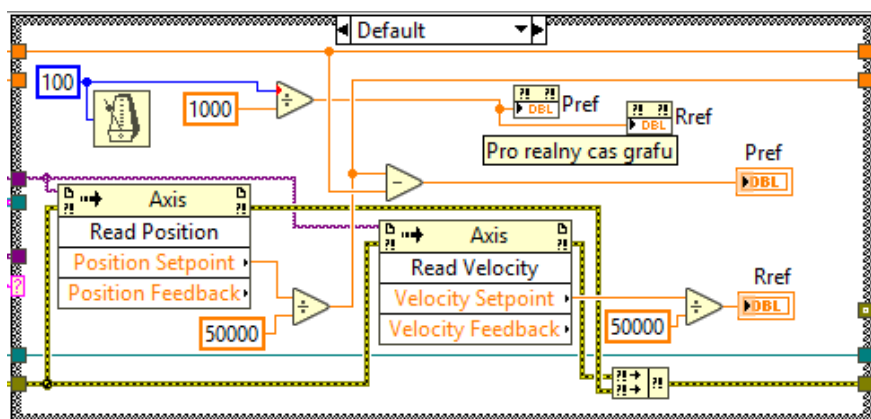
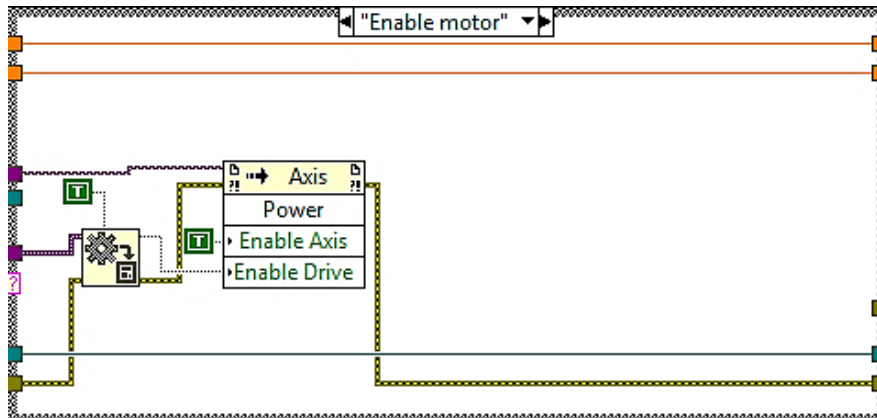
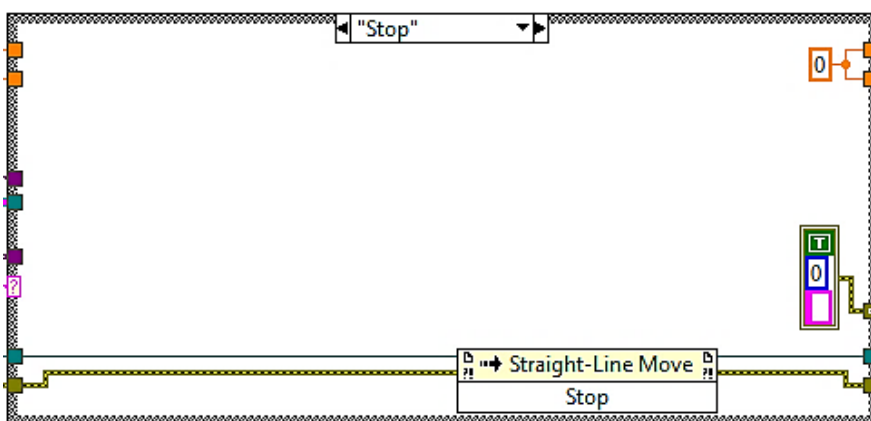
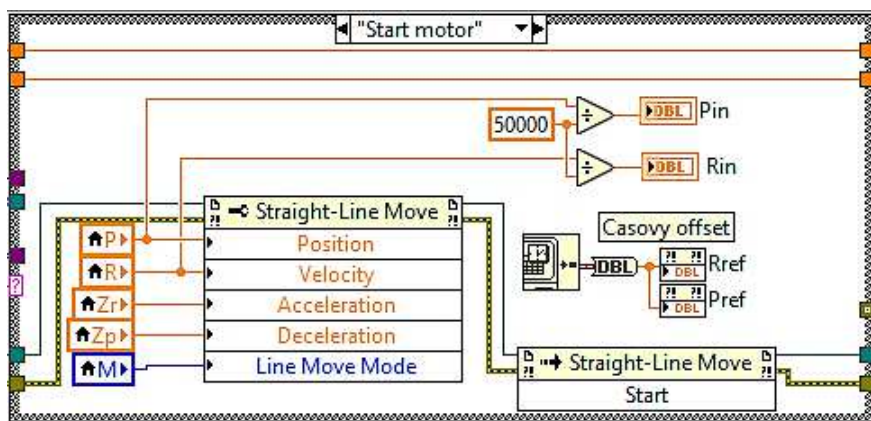
Většina vytvořených události je vyvolána při stisku tlačítka čelního panelu. Pro zachycování změn stavů tlačítek je vytvořena nezávislá úloha (smýčka) s programovou strukturou „Event“. Tato struktura zachycuje všechny nastavené události a podle času vzniku je postupně vykonává.

Pro události, které nejsou časově kritické, je proveden zápis tak, jak je uvedeno na Obr. 41. Takto vytvořená událost při stisknutí tlačítka „Export záznamu“ se vykoná, až na ni přijde řada. Obdobným způsobem je implementováno vytvoření událostí tlačítek „Vynuluj referenci polohy“, „Start DAQ“, „Start/Update motor“ a „Povolit motor“.





Ve třech případech dochází v aplikaci k zápisu do fronty v jiné smyčce, než je smyčka „Uživatelské rozhraní“. Ve všech případech k tomu dochází ve smyčce „Měření“. Informace k těmto zápisům se nacházejí v kapitolách 6.5 a 6.6.

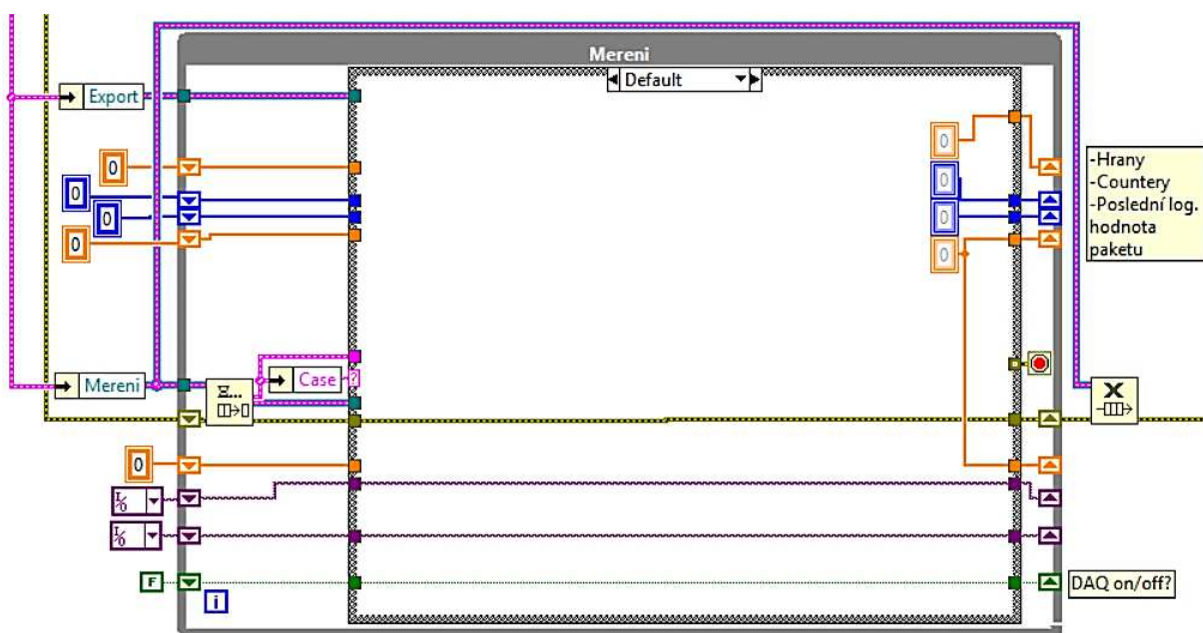


Následující seznam obsahuje popis jednotlivých událostí podle tlačítek, kterými se vyvolají:

- Povolit motor: provede událost „Enable motor“, slouží jako pojistka, až po aktivování spínače pro uvolnění motoru je možné jej roztočit;
- Start/Update motor: provede událost „Start motor“, odeslání informací do motor, v jakém režimu (absolutní a relativní poloha, konstantní rychlost) a s jakými parametry (poloha, rychlost, zrychlení, zpomalení) má motor vykonat požadovaný pohyb nebo jej aktualizovat, obsahuje nastavení počátečních časů do grafů pro polohu a otáčky motoru, přepočítává zadanou rychlost a polohu motoru z mikro kroků na otáčky a zapisuje je do pravé části čelního panelu;
- Stop motor: provede událost „Stop motor“, vyšle signál pro zastavení motoru, nedochází zde k předávání parametrů, motor zastaví se zpomalením zadaným uživatelem při posledním roztočení/aktualizaci parametrů;
- Vynuluj referenci polohy: provede událost „Vynuluj“, softwarové nastavení vlastní reference polohy (motor si drží svou absolutní referenci až do přerušení napájení);
- Default: tato událost se vykonává, pokud fronta neobsahuje žádnou zprávu, umožňuje to kontinuální vyčítání polohy a rychlosti z interního enkodéru motoru (hodnoty jsou přepočteny na otáčky a otáčky za sekundu), vyčítání je časovým zpožděním nastaveno na každých 100ms.

## 6.5 Měření a zpracování naměřených dat

Jak je zmíněno v kapitole 6.1, obě úlohy pro měření analogových i digitálních vstupů sdílejí společné hodiny. Kompletní nastavení kanálů je inicializováno vždy před zahájením měření. To je podmíněno stisknutím tlačítka „Start DAQ“. Po provedení inicializace je zahájeno kontinuální měření. Smyčka neustále měří hodnoty signálů na fyzických kanálech měřicí karty až do doby, kdy je uživatelem vydán pokyn k ukončení měření tlačítkem „Stop DAQ“ nebo celé úlohy tlačítkem „Stop“. Na snímcích Obr. 47 až Obr. 53 jsou rozkresleny všechny události ve smyčce „Měření“.



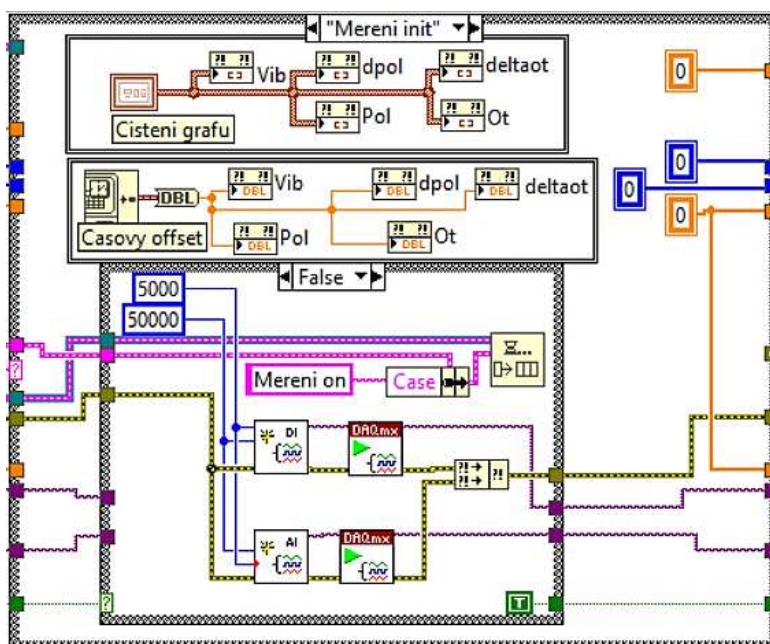
Obr. 47: Smyčka „Měření“ s událostí „Default“

Na Obr. 48 je uvedena inicializace před zahájením měření. Tato událost se vykoná po stisknutí tlačítka „Start DAQ“. Následující seznam popisuje celou událost:

- nastavení počátečního času do grafů umístěných v této smyčce
- zápis události „Měření on“ do fronty, tato událost se vykoná v další iteraci smyčky
- vytvoření virtuálních kanálů odkazujících se na kanály fyzické, Obr. 49 a Obr. 50

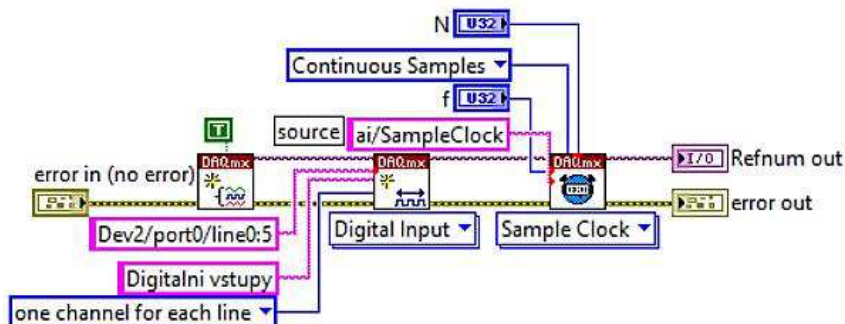


- vzorkovací frekvence je dle návrhu v kapitole 5.2 nastavena na 50kHz a počet vzorků je nastaven na 5000 (tyto hodnoty nelze v koncové aplikaci měnit)
- indikace začátku měření v podobě nastavení True do proměnné typu Boolean (využití je popsáno níže)

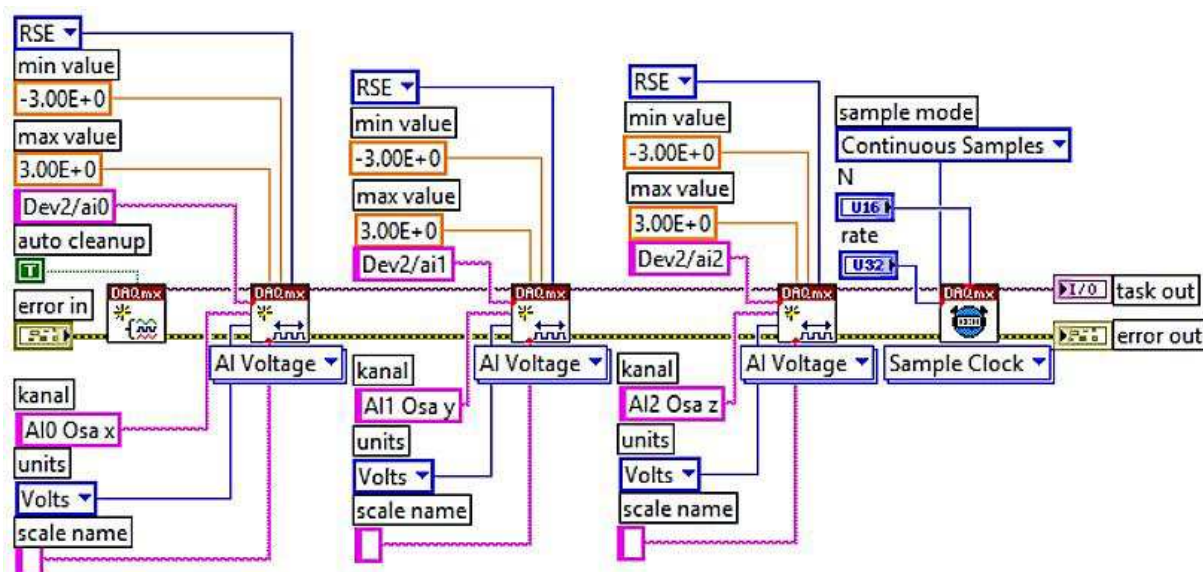


Obr. 48: Událost inicializace před měřením

Digitální vstupy mohou pro vzorkování sdílet některé z dostupných hodin měřicí karty, pokud jsou tyto hodiny aktivně využívány jinou úlohou. Tato podmínka je v rámci používání hodin pro vzorkování analogových signálů splněna. Ukázka kódu s konfigurací analogových a digitálních vstupů je na Obr. 49 a Obr. 50.

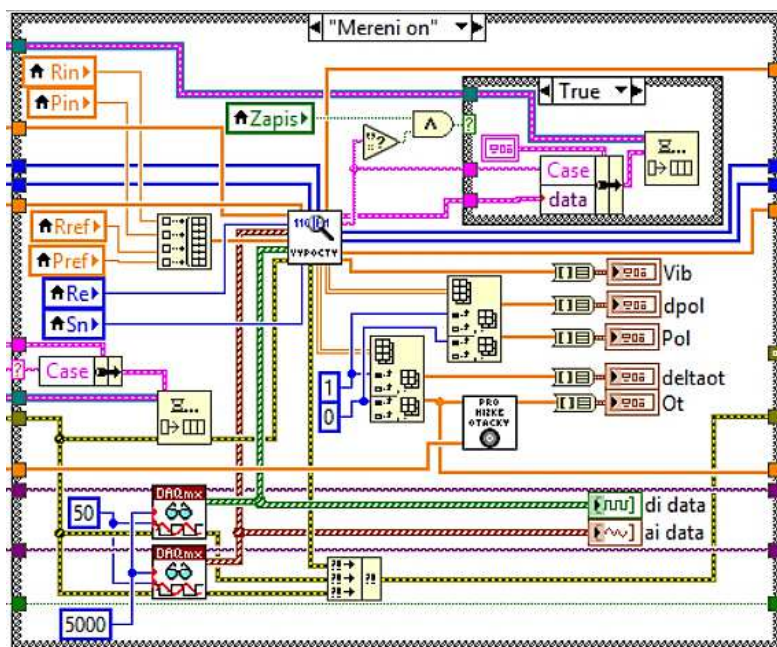


Obr. 49: Konfigurace digitálních vstupů



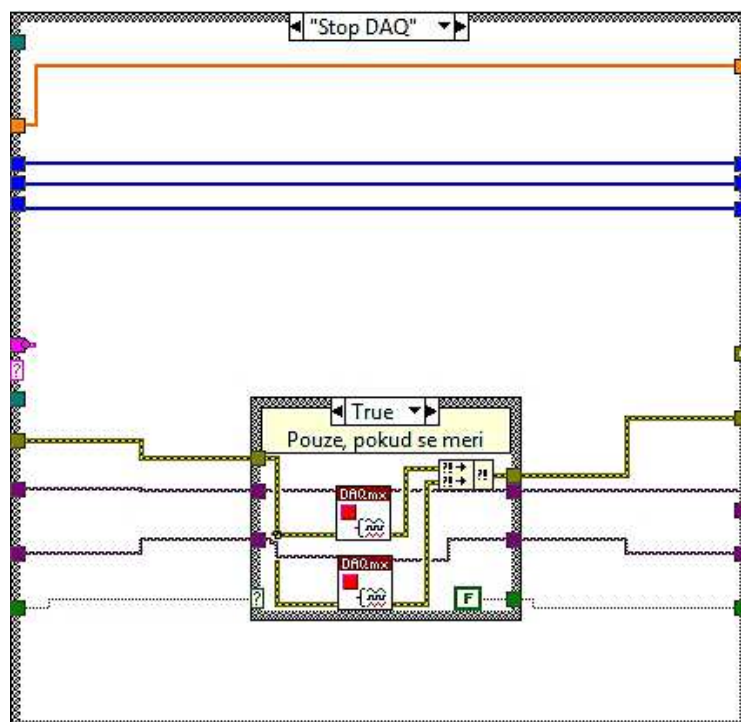
Po inicializaci následuje událost „Měření on“, která je uvedena na Obr. 51, obsahuje následující prvky:

- měření digitálních a analogových vstupů
- výpočty z naměřených dat podle zvoleného režimu výpočtů na čelním panelu
- zápis události „Měření on“ do fronty (tato událost se tak cyklicky opakuje)
- zápis naměřených dat pro jejich následné třídění a export
- manuální nastavení násobiče času v grafech pro udržení reálného času

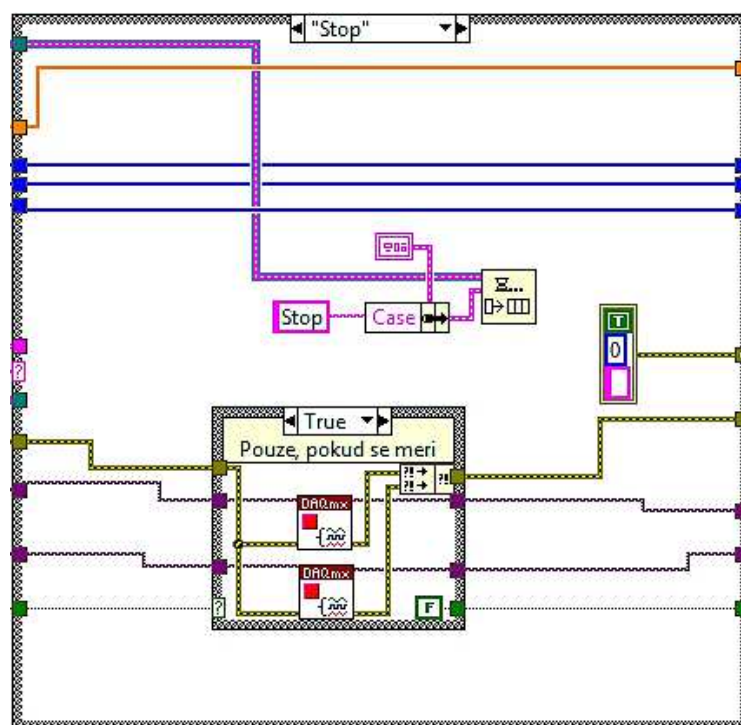


Obr. 51: Událost měření fyzických kanálů měřicí karty

Události na Obr. 52 a Obr. 53 obsahují kód pro ukončení měření. Pokud by uživatel zadal příkaz v ukončení měření, které nebylo započato, výstupem funkcí pro ukončení měření by byla chyba. Tato chyba je ošetřena tak, že ukončení měření je vnořeno do struktury Case structure. Podmínkový terminál této struktury je připojen na proměnnou datového typu Boolean, která je připojena na Shift register. Tato proměnná nese poslední změněnou hodnotu, která se nastavuje na hodnotu True během inicializace měření a na hodnotu False, je-li splněna podmínka pro ukončení měření.



Obr. 52: Událost pro zastavení měření



Obr. 53: Událost pro zastavení smyčky "Měření"

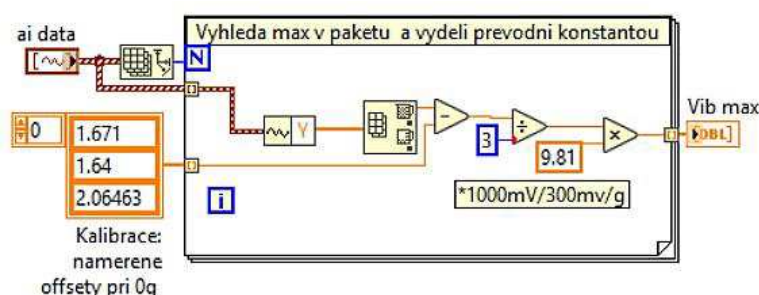
Zpracování dat je koncipováno tak, aby se z nich dokázala vypočítat rychlost motoru, poloha motoru nebo čas každé příchozí hrany pro určení hysterezi snímačů. Při volbě konkrétních výpočtů není nutné provádět všechny ostatní výpočty a zároveň je nutné změnit způsob řízení motoru. Např. při měření rychlosti motoru není nutné znát jeho polohu. Součástí funkce všech výpočtů je i možnost zápisu dat do tzv. archivu. Archivem se zde rozumí přesun dat ze smyčky „Měření“ do smyčky „Export“, kde se data třídí, skládají a exportují. Zápis dat je umožněn přepínačem „Zápis“ v poloze „on“. Části kódu s postupy při výpočtech jednotlivých režimů jsou popsány níže v této kapitole. Rozbor celé funkce obsahující všechny výpočty a jejich zápis je dále vysvětlena v rámci zápisu dat v kapitole 6.6 jako součást exportu dat.



## Zrychlení (vibrace)

Při měření rychlostí otáčení nebo polohy motoru jsou současně vyhodnocovány i vibrace konstrukce v místě uchycení snímače (příruba motoru). Velikosti výstupních napětí z os akcelerometru jsou v aplikaci přepočteny na zrychlení skrze převodní konstantu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, velikost převodní konstanty je u zvoleného akcelerometru 300mV/g. Pro režim měření „Hystereze“ není v současnosti zahrnuto i vyhodnocování vibrací z důvodu zjednodušení. Její doplnění pro měření hystereze snímačů může být předmětem příležitostného rozšíření funkcí úlohy. Ukázka kódu s přepočtem na zrychlení je na Obr. 54.

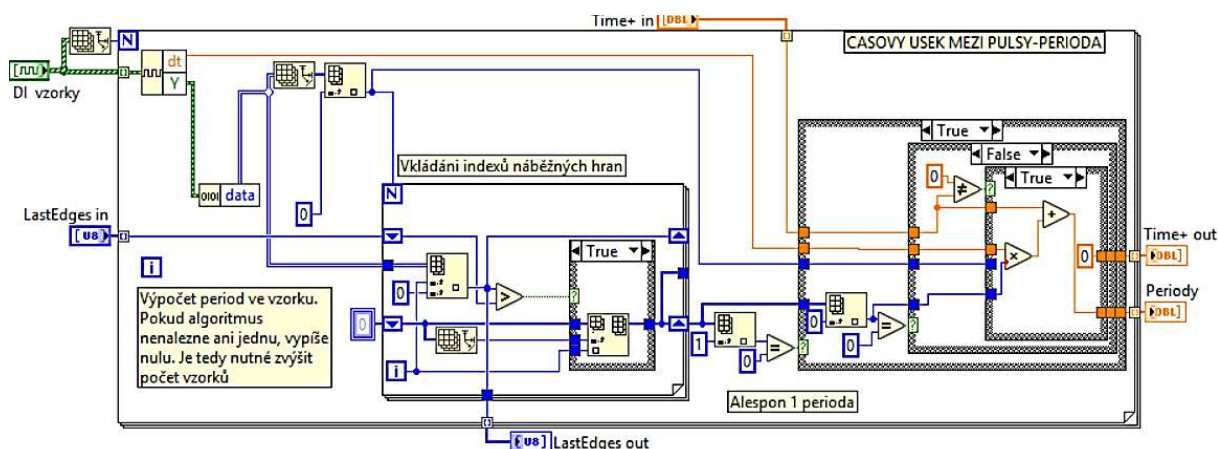
Z pole příchozích vzorků je nalezena maximální hodnota pro každou osu. Od této hodnoty je odečtena hodnota offsetu, který je pro každou osu odlišný a jeho hodnota byla stanovena měřením po jeho montáži na mechanickou konstrukci. Rozdíl hodnot je následně vydělen převodní konstantou a vynásoben gravitačním konstantou pro vyjádření zrychlení v  $\frac{m}{s^2}$ .



Obr. 54: Funkce pro výpočet zrychlení z výstupních napětí akcelerometru

## Konstantní otáčky

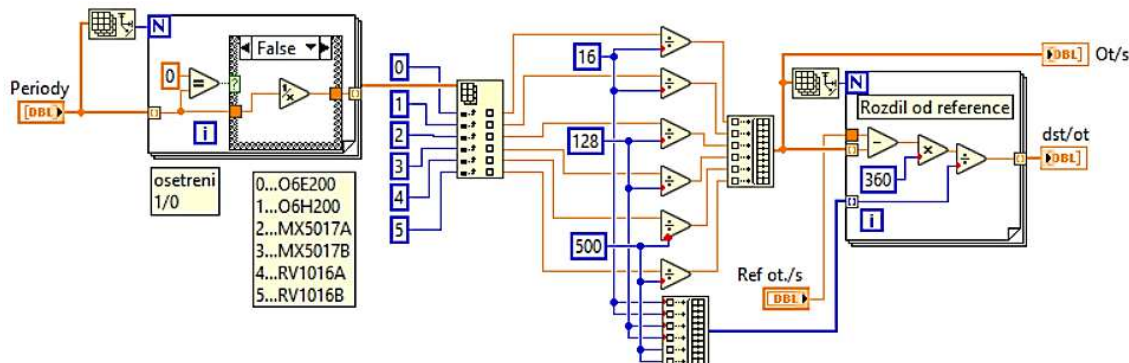
V tomto režimu se motor roztočí na konstantní otáčky režimem pro ovládání motoru Velocity a sledují se odchylky jednotlivých snímačů pro různé rychlosti otáčení. Výstupními daty ze snímačů otáček jsou pole jedniček a nul charakterizující hrany značek na snímacím prvku. V těchto polích se hledají časové úseky mezi nástupnými hranami signálu. Není-li z daného časového okna (paketu vzorků) vyhodnocen časový úsek mezi hranami, dochází k zapamatování doby času celého okna nebo alespoň doby od poslední zachycené hrany do pomocné proměnné, hodnota otáček si uchová poslední nenulovou hodnotu (aby byla změna pozorovatelná). V okamžiku nalezení druhé hrany dochází k součtu se všemi předchozími prázdnými vzorky a konečného stanovení času mezi hranami. Tento postup při získávání časových úseků umožňuje aplikaci měřit i nízké otáčky, kde jeden cyklus měření nestačí k vyhodnocení velikosti otáček. Implementace funkce řešící tento výpočet je znázorněna na Obr. 55.



Obr. 55: Funkce pro výpočet úseku mezi náběžnými hranami

Zjištěný časový úsek je dále přepočten na počet pulsů za sekundu. Podílem počtu pulsů za sekundu počtem značek na otáčku se získá počet otáček za sekundu.

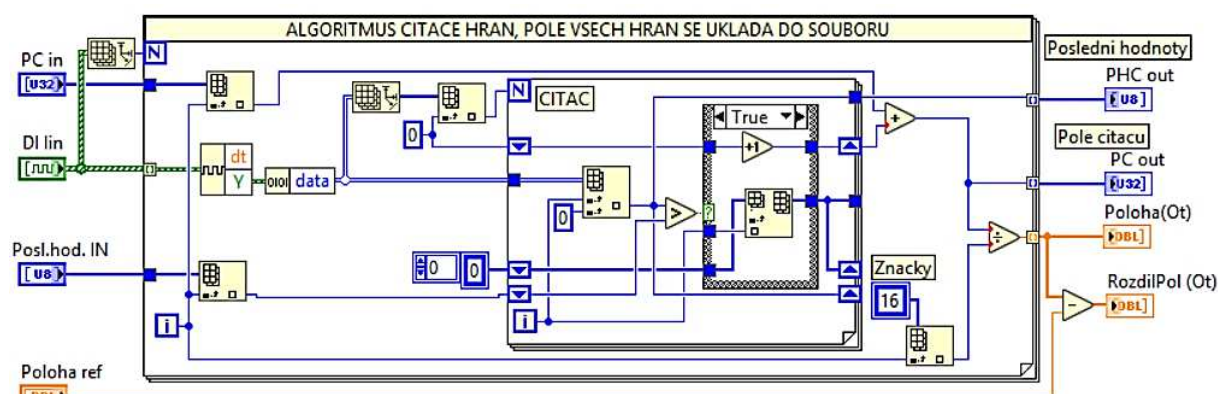
Součástí výpočtu je i přepočet na rozdíl ve stupních. Od referenčních otáček za sekundu je odečtena hodnota vypočtená. Rozdíl otáček je vynásoben 360 stupni (vyjádření rozdílu ve stupních). Posledním krokem je podíl rozdílu ve stupních počtem značek na otáčku. Výsledkem je zprůměrovaný rozdíl ve stupních, o kolik se zpožďuje nasnímání značky pro snímač od reference. Implementace funkce pro výpočet otáček za sekundu a rozdílu ve stupních je na Obr. 56.



Obr. 56: Funkce pro výpočet otáček za sekundu a rozdílu otáček ve stupních

## Poloha

Pro měření polohy je motor řízen v režimu Relative. Režim Absolute se vztahuje na referenční polohu z interního enkodéru. Nejedná se o stejnou hodnotu, která je pro měření přepočtena, proto se doporučuje používat režimu Relative. Snímače zde periodicky mění svou odchylku vůči referenční poloze. Měřením se zjišťuje, zda při měření větších vzdáleností nevznikají trvalé odchylky v podobě narůstajícího offsetu. Implementace funkce pro výpočet polohy motoru je znázorněna na Obr. 57.



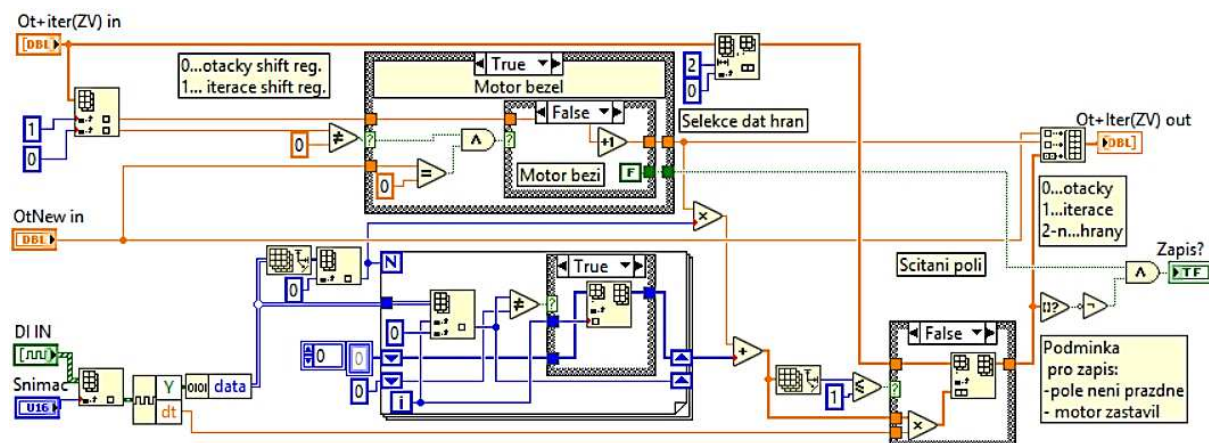
Obr. 57: Funkce pro výpočet polohy motoru

## Hystereze

Cílem měření hystereze snímačů je sledování stejné hrany při chodu motoru tam a zpět. I ideálním případě by se detekovaná hrana převedla na polohu a srovnání poloh by poté ukázalo, zda byla detekována na stejném místě nebo ne. Vzhledem k tomu, že získávání reference nesdílí stejné hodiny, je poskytnutá hodnota pouze pakety se vzorky. Důsledkem je, že uvnitř paketu nelze srovnávat hrany polohou, ale pouze časem, kdy hrana nastala. To znamená, že pro měření jednoho směru otáčení lze porovnat, zda byla hrana nasnímána ve stejném čase při opakování měření. Srovnání hrany s opačným směrem otáčení však leze v časovém měřítku brát v potaz.

Pro měření je vhodné použít režim motoru Relative, kde se motor pootočí o jednu otáčku. Pro srovnání se měření opakuje vícenásobně, a to pro různé rychlosti motoru. Funkce pro výpočet poloh všech značek je na Obr. 58.

Pro celé měření bylo vypracováno zadání s postupem při měření jednotlivých režimů a je uvedeno v příloze č.2.



Obr. 58: Funkce pro výpočet polohy všech hran nasnímaných značek

Z paketu vzorků všech digitálních vstupů („DI IN“) je vybrán řádek, který odpovídá vybranému snímači na čelním panelu („Snímač“). Smyčkou For (smyčka, jejíž počet cyklů je předem definován) je vytvořeno pole, které obsahuje indexy vzorků, ve kterých byla detekována změna logické hodnoty. Při větším počtu iterací je k indexům přičtena hodnota vzorků, které už byly od počátku měření nasnímany. Nakonec je pole indexů přepočteno na čas.

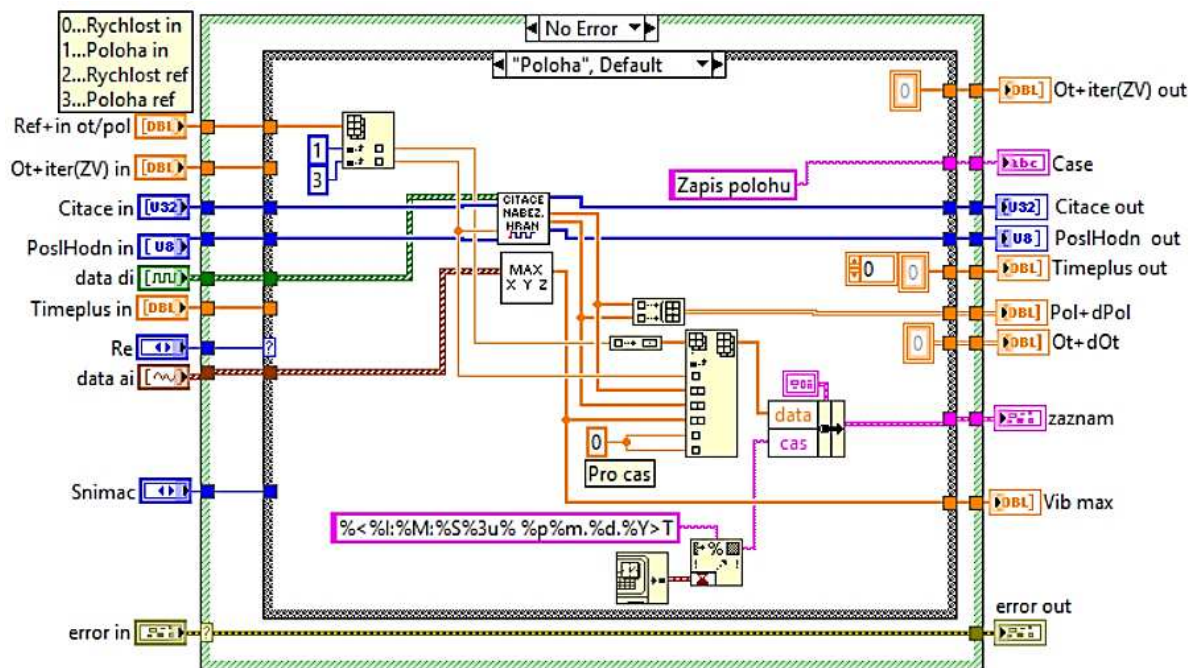
## 6.6 Export naměřených dat

Z naměřených dat je třeba stanovit požadované závislosti a jejich zhodnocení. Informace pro vypracování protokolu z měření včetně návodu k měření jsou sepsány v zadání pro měření, které je uvedeno mezi přílohami.

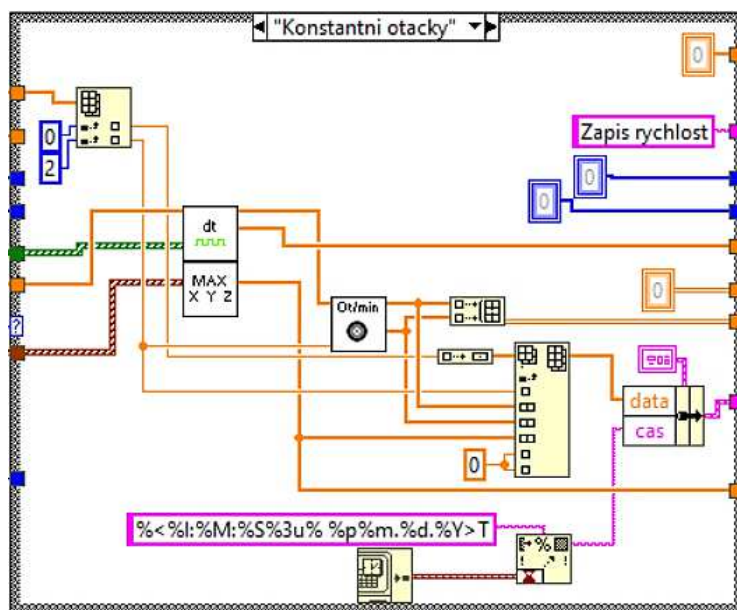
Pro stanovení grafických závislostí mezi vypočítanými hodnotami je vhodné použít program Microsoft Excel. Proto byl pro ukládání dat z měření zvolen formát XLSX. Dalším důvodem použití tohoto formátu je veliký objem dat, který je třeba vhodně rozřadit podle jednotlivých režimů výpočtů tak, aby byla data přehledně uspořádána a připravena k použití.

Princip exportu dat se skládá s několika kroků. Nejprve jsou zvolená data přesunuta frontou do smyčky „Export“, to je umožněno přepínačem „Zápis“ v poloze „on“. Třídění dat zajišťuje String v Clusteru fronty. Pro každý očekávaný text ve Stringu je připravena událost ve struktuře Case smyčky „Export“. Na následujících obrázcích je naznačen přesun dat ze smyčky „Měření“ a jejich třídění ve smyčce „Export“.

Ukázky kódu na Obr. 59 až Obr. 61 uvádějí všechny výpočetní režimy se zaměřením na formátování pro zápis.

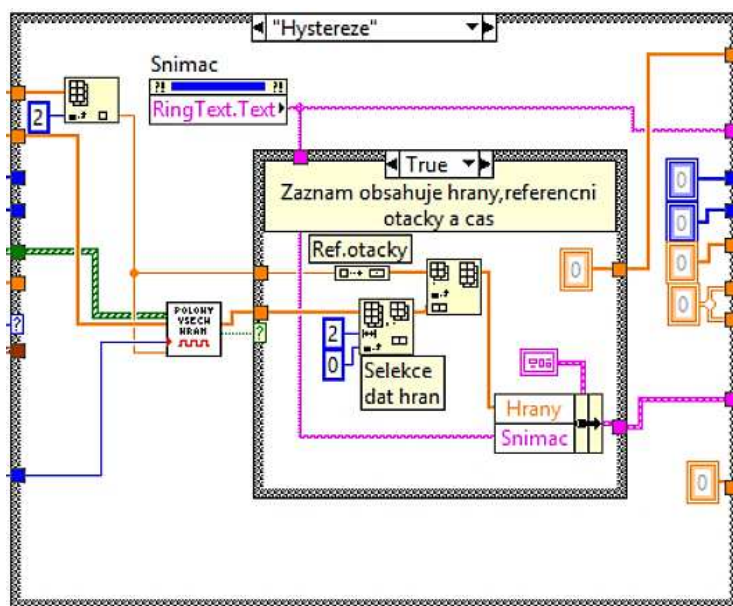


Obr. 59: Funkce „Výpočty“ s výpočty režimu „Poloha“



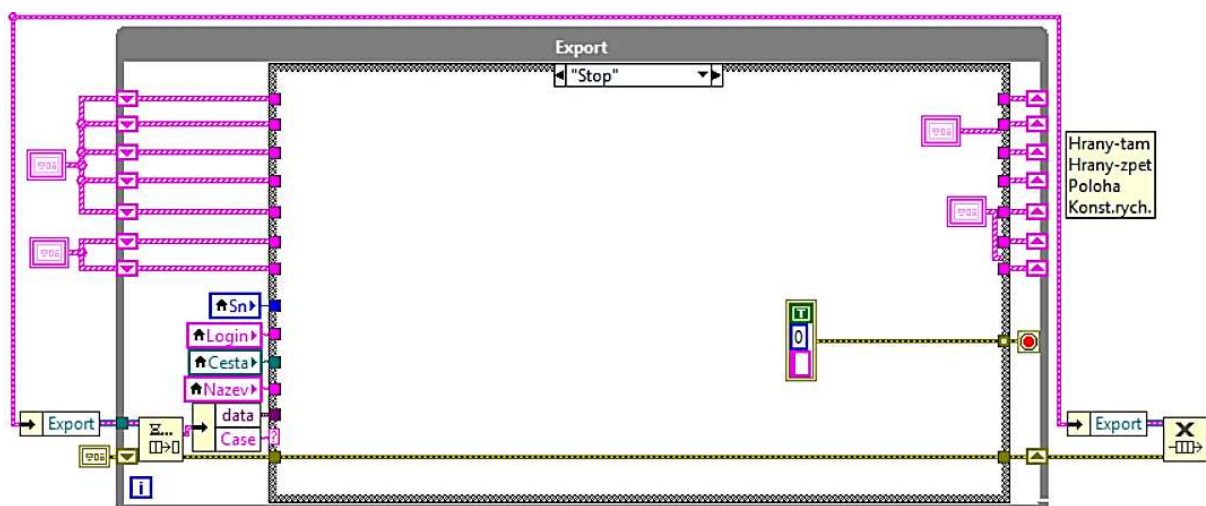
Obr. 60: Výpočty režimu „Konstantní otáčky“





Obr. 61: Výpočty režimu „Hystereze“

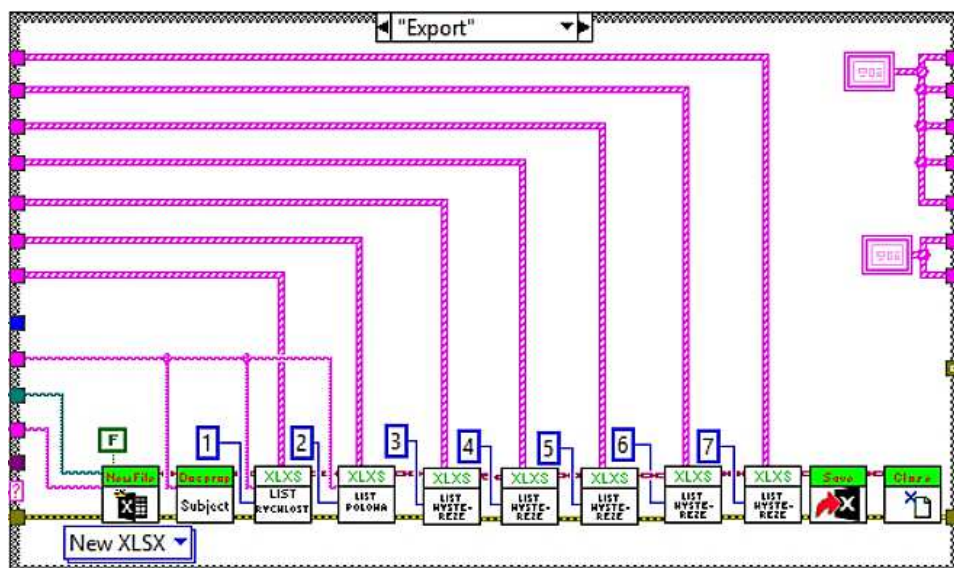
Na Obr. 62 je ukázka smyčky „Export“. Smyčka obsahuje Shift registry pro skládání dat určených k exportu, kde každý z nich reprezentuje data pro jeden list souboru excel. Jak bylo zmíněno výše, třídění dat zajišťuje selektor struktury Case. Data.



Obr. 62: Smyčka „Export“ s událostí „Stop“

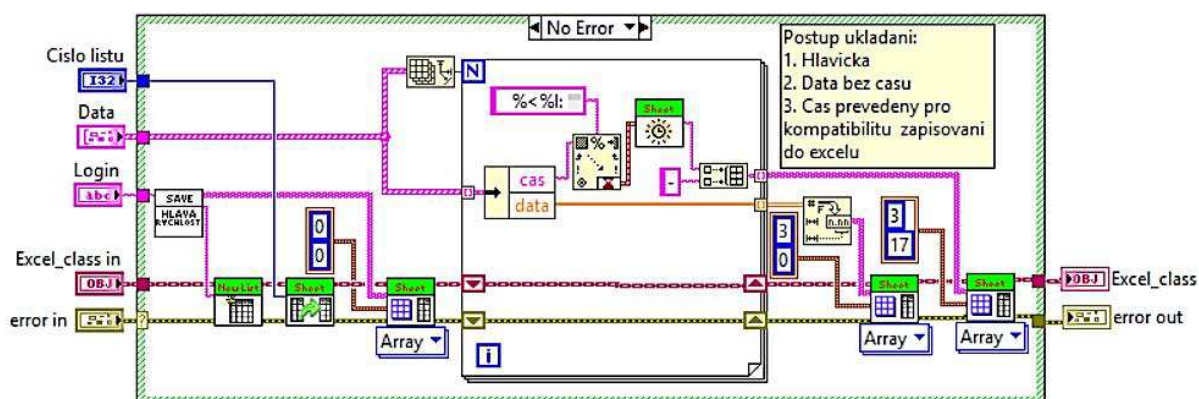
Ukázka kódu na Obr. 63 obsahuje export dat do souboru XLSX. Jestliže soubor zatím neexistuje, je automaticky vytvořen a nese název, který lze nastavit na čelním panelu (defaultně Meas1). Na přepsání souboru je uživatel dotázán. Každý list souboru je vytvořen zvlášť a obsahuje vlastní hlavičku, pod kterou jsou doplněna přidělená data.





Obr. 63: Událost pro export naměřených dat

Vkládání dat do tabulky musí dodržet podmínku, že nesmí vzniknout prázdná buňka, může tak dojít k chybnému zápisu. Postup při tvorbě listu je pro všechny listy stejný s výjimkou struktury hlavičky, proto je zde uvedena ukázka pouze jednoho z nich, a to na Obr. 64. Nejprve je zapsána hlavička, poté data vytažená z Clusteru a nakonec čas, který je nutno zapsat zvlášť, jelikož je jiného datového typu. Příklad exportovaného souboru s naměřenými daty se nachází v příloze č.3.



Obr. 64: Ukázka kódu zápisu dat s časovým razítkem do listu souboru excel

Pro řešení exportu naměřených dat byla použita knihovna funkcí pro LabVIEW s názvem CLAUDIE.xlsx. Tato knihovna je produktem společnosti ATEsystem s.r.o. a je určena pro komerční využití.

Pro návrh struktury aplikace byly využity poznatky získané z učebních textů pro předměty „Virtuální Instrumentace 2“ a „Systémy pro měření a sběr dat“ napsané doc. Ing. Petrem Bilíkem, Ph.D. [34] a [27]. Při implementaci kódu byly využity techniky popsané v publikacích Jaroslava Vlacha a kolektivu autorů, Thomase J. Bresse, a Ricka Bittera a kolektivu autorů [35], [36], [37].

## Závěr

Během vypracovávání závěrečné práce jsem uplatnil poznatky, které jsem získal během studia. Návrh mechanické konstrukce pro tuto práci rozšířil mé vědomosti v oblastech mechaniky a programování.

Při výběru prvků mechanické konstrukce jsem často musel konzultovat své požadavky přímo s výrobcem. Nejsložitější úlohou při stavbě mechanické konstrukce bylo vystředění soustavy motoru, prodloužené hřídele a inkrementálního snímače. Přesnost vystředění této soustavy značně ovlivňovala maximální otáčky, kterými se motor mohl otáčet, aniž by zareagovala jeho proudová ochrana. Nejvyšší rychlost otáčení, které bylo možné středěním dosáhnout byla 720 ot/min z možných 3000 ot/min.

Při návrhu aplikace bylo velikou výhodou souběžné absolvování předmětů zabývajících se sběrem a zpracováním dat v LabVIEW, což usnadnilo řešení některých prvků aplikace. V některých případech jsem si však musel dostudovat některé principy v podkladech pro navazující studium.

### Zhodnocení mechanické konstrukce:

- Pozitiva:
  - kompaktní a snadno přenositelný prvek
  - modulárnost hliníkové konstrukce (možnost upevnění dalších prvků)
  - přehledné uspořádání prvků
  - tlumení spodní části konstrukce silentbloky
- Negativa:
  - vyšší cena použitím hliníkových profilů
  - profily našroubované na silentbloky vykazují větší chvění a tím chvění horní části konstrukce
  - chvění horní části konstrukce znemožňuje roztočit motor na otáčky vyšší, jak 720 ot/min, zde vybaví nadproudová ochrana motoru a vypne jej

Možnosti rozšíření:

- použití tužších silentbloků, popřípadě je nahradit svorníky

### Zhodnocení softwarového řešení:

- Pozitiva:
  - možnost ovládání motoru a sběru dat v jedné aplikaci
  - přehledné uspořádání grafů, které je přizpůsobeno výpočetním úlohám v aplikaci
  - export dat do přehledného formátu, který už není nutné před dalším použitím upravovat
- Negativa:
  - mezi jednotlivými pakety vzorků není hodnota referencí aktualizována, nelze tak zjistit, zda je daná hrana detekována ve stejném místě motoru při obou směrech otáčení (lze však proměřit časovou rovnoměrnost mezi hranami – viz režim výpočtu Hystereze)
- Možnosti rozšíření:
  - synchronizace časového razítka vzorků s časovým razítkem referencí motoru

## Literatura

- [1] „Jak se řídí krokové motory?“, [Online]. Available: <http://www.stomisi.cz/jak-se-ridi-krokovye-motory>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [2] „Aktivní krokový motor“, [Online]. Available: <https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRj00bXFOykjzxbZy-HfgszLPkchow4B7x6xyJWkMHmRwTK2jdkSQ>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [3] „Stepping sequence for variable reluctance stepper“, [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-13/stepper-motors/>. [Přístup získán 2017-04-24].
- [4] „Hybridní krokový motor“, [Online]. Available: [https://www.servo-drive.cz/specialni\\_krokovye\\_motory\\_krokovye\\_motory\\_na\\_miru.php](https://www.servo-drive.cz/specialni_krokovye_motory_krokovye_motory_na_miru.php). [Přístup získán 2017-04-27].
- [5] „Čtyřtaktní po jedné fázi“, [Online]. Available: <http://www.kvd.zcu.cz/cz/materialy/POS/HTML/69/Ob25.png>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [6] „Čtyřtaktní po dvou fázích“, [Online]. Available: <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT31LBLMo3bdRN7kB3JmpIpwpRw9JTc-IVqiyKyYMIQPbyQDDKJ>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [7] „Osmitaktní po dvou fázích“, [Online]. Available: <http://www.kvd.zcu.cz/cz/materialy/POS/HTML/13/Ob2.png>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [8] „Mikrokrokování“, [Online]. Available: [http://www.servo-drive.cz/img/custom\\_steppers/how\\_does\\_it\\_work\\_cs\\_quarter\\_stepping\\_stator\\_rotor.gif](http://www.servo-drive.cz/img/custom_steppers/how_does_it_work_cs_quarter_stepping_stator_rotor.gif). [Přístup získán 2017-01-16].
- [9] „Mikrokrokování: sny a skutečnost“, [Online]. Available: [http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2016/03/mikrokrok1\\_1-1024x764.jpg](http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2016/03/mikrokrok1_1-1024x764.jpg). [Přístup získán 2017-01-16].
- [10] „Mikrokrokování: sny a skutečnost“, [Online]. Available: <http://robodoupe.cz/2016/mikrokrokovani-sny-a-skutecnost/>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [11] „Jednocestné světelné závory“, [Online]. Available: [http://www.ifm.com/ifmcz/web/pmain/010\\_050\\_030.html](http://www.ifm.com/ifmcz/web/pmain/010_050_030.html). [Přístup získán 2017-01-16].
- [12] „How the Phototransistor Circuit Works“, 2017. [Online]. Available: <http://learn.parallax.com/tutorials/robot/shield-bot/robotics-board-education-shield-arduino/chapter-6-light-sensitive-11>. [Přístup získán 2017-04-24].
- [13] „O6S200: Jednocestná světelná závora“, [Online]. Available: <http://www.ifm.com/products/gb/ds/O6S200.htm>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [14] „Zapojení kontaktů O6S200“, [Online]. Available: [http://www.ifm.com/tedo/an/i\\_1447.gif](http://www.ifm.com/tedo/an/i_1447.gif). [Přístup získán 2017-01-16].
- [15] „O6H200: Reflexní světelný smínač“, [Online]. Available: <http://www.ifm.com/products/cz/ds/O6H200.htm>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [16] Z. Jehlár, „Vliv externích elektromagnetických polí na funkci snímačů otáček“, Brno, 2009.
- [17] „Průběh výstupního signálu z enkodéru“, 2009. [Online]. Available: <http://robotika.vosrk.cz/guide/sensors/decode/signal2.gif>. [Přístup získán 2017-04-18].
- [18] „V1. Hallův jev: Laboratorní cvičení z Fyziky“, [Online]. Available: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_2/F2\\_lab\\_V1.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_lab_V1.pdf). [Přístup získán 2017-01-16].
- [19] „Vliv externích elektromagnetických polí na funkci snímačů otáček: Diplomová práce“, BRNO, 2009.
- [20] „Tranzistorový spínavý výstup“, 2008. [Online]. Available: <http://automatizace.hw.cz/mag-senzory-s-hallovym-efektem-4-dil-senzory-s-digit-vystupem>. [Přístup získán 2017-04-18].
- [21] „Zapojení kontaktů MX5017“, [Online]. Available: [http://www.ifm.com/tedo/an/i\\_0046.gif](http://www.ifm.com/tedo/an/i_0046.gif). [Přístup získán 2017-01-16].

- [22] „MX5017: Senzory otáček,“ [Online]. Available: <http://www.ifm.com/products/cz/ds/MX5017.htm>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [23] „Functional block diagram,“ 2010. [Online]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/535833/AD/ADXL335BCPZ.html>. [Přístup získán 2017-04-18].
- [24] „Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ?,“ [Online]. Available: <http://vyvoj.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [25] „Akcelerometry,“ 2010. [Online]. Available: <http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3M38MSZ/uloha14a.pdf>. [Přístup získán 2017-04-18].
- [26] „Zkušební Deska Akcelerometru,“ [Online]. Available: [http://uk.farnell.com/productimages/standard/en\\_GB/1699046-40.jpg](http://uk.farnell.com/productimages/standard/en_GB/1699046-40.jpg). [Přístup získán 2017-01-16].
- [27] P. Bilík, „Virtuální instrumentace 2,“ Ostrava, 2012.
- [28] „Aliasing,“ [Online]. Available: [http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc\\_eps\\_aliasing\\_effects.gif](http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc_eps_aliasing_effects.gif). [Přístup získán 2017-01-16].
- [29] „Aliasing,“ [Online]. Available: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361G-01/lvanlsconcepts/aliasing/>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [30] „Aliasing,“ [Online]. Available: [http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc\\_eps\\_asfc.gif](http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc_eps_asfc.gif). [Přístup získán 2017-01-16].
- [31] „Aliasing,“ [Online]. Available: [http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc\\_eps\\_sfca.gif](http://zone.ni.com/images/reference/en-XX/help/371361G-01/loc_eps_sfca.gif). [Přístup získán 2017-01-16].
- [32] „Simultaneous Sampling Data Acquisition Architectures,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4105/en/>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [33] „NI 6023E/6024E/6025E Family Specifications: Manuals,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/370719c.pdf>. [Přístup získán 2017-01-16].
- [34] P. Bilík, „Systémy pro měření a sběr dat,“ Ostrava, 2012.
- [35] J. Vlach, J. Havlíček a M. Vlach, Začínáme s LabVIEW, Praha: BEN, 2008.
- [36] T. J. Bress, Effective labview programming, 1 editor, Allendale: NTS Press, 2013.
- [37] R. Bitter, T. Mohiuddin a M. Nawrocki, Labview\_ advanced programming techniques, 2nd editor, Boca Rota: CRC/Taylor & Francis, 2007.

## **Seznam příloh**

1. Schéma zapojení svorkovnice Nacionál Instruments PXI-6221
2. Zadání pro měřicí úlohu
3. Příklad exportovaného souboru s naměřenými daty

# **Příloha č.1: Schéma zapojení svorkovnice Nacional Instruments PXI-6221**

## **NI PCI/PXI-6221 (68-Pin)**

AI 0	68	34	AI 8
AI GND	67	33	AI 1
AI 9	66	32	AI GND
AI 2	65	31	AI 10
AI GND	64	30	AI 3
AI 11	63	29	AI GND
AI SENSE	62	28	AI 4
AI 12	61	27	AI GND
AI 5	60	26	AI 13
AI GND	59	25	AI 6
AI 14	58	24	AI GND
AI 7	57	23	AI 15
AI GND	56	22	AO 0
AO GND	55	21	AO 1
AO GND	54	20	NC
D GND	53	19	P0.4
P0.0	52	18	D GND
P0.5	51	17	P0.1
D GND	50	16	P0.6
P0.2	49	15	D GND
P0.7	48	14	+5 V
P0.3	47	13	D GND
PFI 11/P2.3	46	12	D GND
PFI 10/P2.2	45	11	PFI 0/P1.0
D GND	44	10	PFI 1/P1.1
PFI 2/P1.2	43	9	D GND
PFI 3/P1.3	42	8	+5 V
PFI 4/P1.4	41	7	D GND
PFI 13/P2.5	40	6	PFI 5/P1.5
PFI 15/P2.7	39	5	PFI 6/P1.6
PFI 7/P1.7	38	4	D GND
PFI 8/P2.0	37	3	PFI 9/P2.1
D GND	36	2	PFI 12/P2.4
D GND	35	1	PFI 14/P2.6

NC = No Connect

## Příloha č.2: Zadání pro měřící úlohu

### MĚŘÍCÍ ÚLOHA UČEBNY EB304: MĚŘENÍ OTÁČEK MOTORU

JMÉNO:  
DATUM:

LOGIN:

#### **Zadání:**

Pomocí aplikace „EB304\_Mereni\_otacek“ v prostředí LabVIEW proved'te měření otáček, polohy a vibrací na přírubě motoru. Jako reference jsou stanoveny data interního enkodéru použitého motoru Nacionál Instruments ISM-7411E. Informace k ovládání motoru naleznete v kartě „Info k řízení motoru“ na čelním panelu aplikace.

1. Měření konstantní rychlosti: Změřte rychlost otáčení motoru všemi dostupnými snímači. Nastavte motoru konstantní rychlost otáčení a umožněte zápis dat přepínačem „Zápis“ v poloze „on“. Po získání dat se doporučuje tento přepínač vždy deaktivovat, aby výsledný soubor obsahoval pouze užitečná data.
  - a) Proměřte otáčky motoru točícího se konstantní rychlostí pro rozsah otáček 0-12 ot/s.
  - b) Z vypočítaných hodnot aplikace stanovte grafické závislosti maximálních odchylek jednotlivých snímačů na rychlosti otáčení motoru (pro určení odchylky konkrétních otáček využijte alespoň 5 hodnot).
  - c) Ze stanovených grafických závislostí zhodnoťte použité senzory otáček při měření velikosti otáček.
2. Měření polohy: Změřte polohu motoru všemi dostupnými snímači pro různé rychlosti otáčení. Parametry pohybu volte tak, aby motor během pohybu dosáhl nastavených otáček. Toto lze ověřit vykonáním pohybu bez aktivovaného zápisu.
  - a) Vynulujte referenci polohy tlačítkem „Vynuluj referenci polohy“ na čelním panelu. Poté aktivujte přepínač „Zápis“ do polohy „on“, a to ještě před roztočením motoru, aby výpočet polohy začal s rozběhem motoru.
  - b) Z vypočtených hodnot aplikace, tj. polohy motoru od reference, stanovte grafické závislosti této odchylky na rychlosti otáčení pro jednotlivé snímače.
  - c) Ze stanovených grafických závislostí zhodnoťte, zda snímače neobsahují nahodilé chyby, které by znamenaly narůstající odchylku od referenční polohy.
3. Měření hystereze snímačů: Současná podoba měření hystereze snímačů zjišťuje, zda detekce zvolené hrany nastane ve stejném časovém okamžiku při opakování měření za stejných parametrů, a to při různých rychlostech otáčení motoru. Srovnání detekce hrany při chodu motoru tam a zpět však není v rámci řešení aplikace možné.
  - a) V tomto bodu měření postupujte stejným způsobem, jako při měření polohy, avšak s tím rozdílem, že jako polohu nastavte pro usnadnění pouze jednu otáčku
  - b) Opakujte měření pro různé rychlosti otáčení, dokud se motor nestihne roztočit na požadovanou rychlost během svého pohybu.
  - c) Z vypočtených hodnot aplikace, tj. čas příchodu jednotlivých hran, stanovte grafické závislosti časových odchylek příchodu vybrané hrany na rychlosti otáčení pro jednotlivé snímače. Vybranou hranu volte s místě, kde bude mít motor nejvyšší otáčky (uprostřed).
  - d) Ze stanovených grafických závislostí srovnajte použité snímače z hlediska rovnoměrnosti detekce hrany

### Příloha č.3: Příklad exportovaného souboru s naměřenými daty

Rychlosti	-	-	-	-	-	dst-ot	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zadane	Referenc	O6E200	O6H200	MX5017-A	RV1016-A	RV1016-B	O6E200	O6H200	MX5017-A	MX5017-B	RV1016-A	RV1016-B	ADXL335B	ADXL335B	ADXL335B	Cas
2.000000	1.983333	1.994257	2.029221	2.003205	2.000000	2.000000	-0.245772	-1.032468	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.138097	0.013059	0.096279	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.998082	1.991714	2.003205	2.000000	2.000000	-0.331841	-0.188576	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.237646	0.004632	0.125775	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	2.004490	2.010940	2.003205	2.000000	2.000000	-0.476026	-0.621139	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.221844	0.007265	0.229537	24.4.17 15:47
2.000000	1.966667	1.999360	2.008355	2.003205	2.000000	2.000000	-0.735605	-0.937982	-0.102764	5.531250	-0.024000	-0.024000	0.013794	0.124195	0.012005	24.4.17 15:47
2.000000	2.016667	2.013531	1.989179	2.003205	2.000000	2.000000	0.070554	0.618475	0.037861	5.671875	0.012000	0.012000	0.075946	0.151057	0.018326	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.991714	2.031860	2.003205	2.000000	2.000000	-0.188576	-1.091840	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.231852	0.158431	0.186874	24.4.17 15:47
2.000000	2.016667	1.998082	1.987913	1.992985	2.000000	2.000000	0.418159	0.646947	0.066606	5.671875	0.012000	0.012000	0.223951	-0.000109	0.085745	24.4.17 15:47
2.000000	1.966667	2.004490	2.010940	2.003205	2.000000	2.000000	-0.851026	-0.996139	-0.102764	5.531250	-0.024000	-0.024000	0.029068	0.037814	0.174233	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.994257	2.010940	1.992985	2.000000	2.000000	-0.245772	-0.621139	-0.027144	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.254500	0.219529	0.153691	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	2.008355	1.987913	2.003205	2.000000	2.000000	-0.562982	-0.103053	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.033809	-0.002216	0.006738	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.992985	2.033182	2.003205	2.000000	2.000000	-0.217156	-1.121584	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.025908	0.242178	0.054669	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.999360	1.995530	2.003205	2.000000	2.000000	-0.360605	-0.274425	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.042763	0.087852	0.171599	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.999360	2.010940	1.992985	2.000000	2.000000	-0.360605	-0.621139	-0.027144	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.250287	0.007265	0.016745	24.4.17 15:47
2.000000	2.016667	1.996805	2.010940	1.992985	2.000000	2.000000	0.446885	0.128861	0.066606	5.671875	0.012000	0.012000	0.141258	0.195301	0.257453	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	2.009646	1.985388	2.003205	2.000000	2.000000	-0.592042	-0.046220	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.237119	-0.003269	0.221637	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.995530	2.033182	2.003205	2.000000	2.000000	-0.274425	-1.121584	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.023801	-0.003796	0.036761	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.999360	1.992985	1.992985	2.000000	2.000000	-0.360605	-0.217156	-0.027144	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.026435	0.238491	0.023593	24.4.17 15:47
2.000000	1.966667	2.001922	2.010940	2.003205	2.000000	2.000000	-0.793242	-0.996139	-0.102764	5.531250	-0.024000	-0.024000	0.034862	0.002525	0.191614	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.995530	2.008355	1.992985	2.000000	2.000000	-0.274425	-0.562982	-0.027144	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.058037	0.101019	0.223217	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	2.009646	1.989179	2.003205	2.000000	2.000000	-0.592042	-0.131525	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.003260	0.024120	0.003578	24.4.17 15:47
2.000000	2.016667	1.994257	2.033182	2.003205	2.000000	2.000000	0.504228	-0.371584	0.037861	5.671875	0.012000	0.012000	0.020641	0.210049	0.015165	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	1.996805	1.995530	2.003205	2.000000	2.000000	-0.303115	-0.274425	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.035916	0.022013	0.001471	24.4.17 15:47
2.000000	1.983333	2.001922	2.013531	2.003205	2.000000	2.000000	-0.418242	-0.679446	-0.055889	5.578125	-0.012000	-0.012000	0.047503	0.232697	0.206889	24.4.17 15:47